

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(2):372-383, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.02.002.

Man W M, Zhou T J, Zhang L X, et al. Contributions of natural and anthropogenic forcings in twentieth-century temperature change: results from LASG/IAP climate system model FGOALS_gl. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(2):372-383, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.02.002.

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

满文敏^{1,2}, 周天军¹, 张丽霞^{1,2}, 吴波¹, 张洁^{1,2}

1 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(LASG), 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘 要 本文基于中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学国家重点实验室(LASG/IAP)发展的气候系统模式 FGOALS_gl 对近百年气温变化的模拟, 讨论了自然变率和人为因素对 20 世纪全球变暖的相对贡献. 数值试验结果表明, 在自然和人为因子的共同强迫作用下, 耦合模式能够合理再现 20 世纪全球平均气温随时间的演变; 仅在自然因子作用下, 模式不能再现 1970 年以后的全球变暖. 自然因素对 20 世纪第一次变暖的作用是显著的, 但温室气体是 20 世纪后期变暖的主要原因. 在这一定性结论基础上, 进一步对近百年变化中自然和人为因素的相对贡献做定量的归因分析, 结果表明, 除赤道中东太平洋和北大西洋外, 人为因素对近百年的增暖起决定性作用. 对全球、半球及大陆尺度而言, 外强迫可以解释平均气温变化的 70% 以上, 而内部变率贡献较小; 但对于区域尺度而言, 多数地区内部变率的贡献大于外强迫, 区域尺度气温变化的机制较全球、半球尺度要复杂. 对中国地区而言, 20 世纪早期的气温变化受自然变率影响, 但 20 世纪后期的变暖主要是温室气体增加的结果. 中国东部气温变化的空间分布表明, 自然因素对近 50 年及近百年中国地区的变暖趋势贡献较小. 在自然和人为因子共同作用下, 模式能够再现近 50 年中国东部气温变化冬春两季增暖的特征, 但没有模拟出夏季长江中下游地区及淮河流域的降温趋势; 自然因子试验的结果表明, 太阳活动对该区域的变冷有贡献, 但模式无法再现该地区气温的季节变化特征.

关键词 气候系统模式, 20 世纪气温变化, 自然变率, 人为因素, 归因模拟

doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.02.002

中图分类号 P467

收稿日期 2010-12-17, 2011-05-20 收修定稿

Contributions of natural and anthropogenic forcings in twentieth-century temperature change: results from LASG/IAP climate system model FGOALS_gl

MAN Wen-Min^{1,2}, ZHOU Tian-Jun¹, ZHANG Li-Xia^{1,2}, WU Bo¹, ZHANG Jie^{1,2}

1 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics,
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2 Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Contributions of natural and anthropogenic forcings in the twentieth-century air temperature change are evaluated with a climate system model named FGOALS_gl developed at LASG/IAP. The HadCRUT3v dataset is used to validate the model. Observed warming trends on the global scale and in many regions are simulated more realistically in the all-forcing run than

in the natural-only forcing experiment. The simulations support that the twentieth-century global warming could have resulted from a combination of natural and anthropogenic forcings, with human-induced radiative forcing being the dominant cause of the pronounced late twentieth-century warming. For global and hemispheric means, external forcings could explain most of the variance; however, the tropical eastern Pacific and the North Atlantic are examples of regions where internal variability may dominate. Attributions generally become more difficult on regional scales due to both a decreasing externally forced signal level and an increasing internally generated noise level. The reproducibility of the air temperature averaged over China is lower than that of the global and hemispheric averages. Anthropogenic forcings are simulated to act as the dominant role for the late twentieth century warming over China.

Keywords Climate system model, Twentieth-century air temperature change, Natural variability, Anthropogenic forcing, Attribution

1 引言

全球变暖是 20 世纪气候变化的主要特征^[1]. 关于其成因, 目前认为主要有三种因素在起作用: 首先是人类活动影响, 主要是人为温室气体排放和硫酸盐气溶胶变化; 其次是自然因素作用, 主要包括太阳辐射和火山气溶胶的影响; 最后是气候系统内部变率的影响, 如大洋热盐环流的自然振荡等^[2]. 对 20 世纪气候变暖机理的准确认识, 对理解过去气候变化及预估未来气候变化都至关重要.

气候模式是开展 20 世纪气候变化机理研究的重要工具^[3]. “气候变率与可预报性研究计划”(CLIVAR) 设立了“20 世纪气候模拟国际比较计划”C20C (climate of the 20th century), 其各阶段的任务是利用不同复杂程度的气候模式对 20 世纪气候变化进行归因研究^[4-6]. 李立娟等^[7] 利用 LASG 格点大气模式 GAMIL 参加了 C20C 第二阶段模拟试验, 试验结果表明, 20 世纪 30 年代和自 70 年代开始的增暖, 均由外强迫所致. 已有的海气耦合模拟试验亦表明, 20 世纪早期的变暖主要是由太阳辐射变化引起的^[8-10], 尽管内部变率亦有贡献; 而对于 20 世纪后期的变暖, 目前主要认为是温室气体增加的结果^[11-12]. 在政府间气候变化委员会 (IPCC) 第四次评估报告 (AR4) 中, 有 24 个耦合模式提供了 20 世纪气候模拟试验结果, 这些模式无论在物理过程还是在模式分辨率上都较此前有了很大的提高^[1]. Zhou 等人^[13] 检验了参加 IPCC AR4 的 19 个全球知名海气耦合模式对 20 世纪全球气温变化的模拟, 就全球平均气温变化而言, 在自然因子和人为因子的共同强迫作用下, 多数耦合模式能够成功再现全

球平均气温在过去百年的实际演变, 多模式集合的结果与观测序列的相关系数可以达到 0.87, 但模式间的离差亦很大, 特别是在 20 世纪前半叶. 方差分析表明, 外强迫可以解释 20 世纪全球年平均气温变化的 60.5%, 而来自“海-陆-气-冰”耦合系统的内部变率则解释了 39.5%.

国内学者亦围绕着中国区域的气温变化, 进行了大量模拟研究. Zhou 等人^[13] 的研究指出, 在给定人为和自然外强迫的综合作用下, 上述 19 个海气耦合模式对 20 世纪中国气温演变的模拟效果, 较之全球平均要差, 考虑了太阳辐射和火山气溶胶变化的模式, 大多数能够合理再现 20 世纪上半期中国气温变化的主要特征; 近 50 年的中国气温变化, 主要受温室气体变化的影响. 此外, 内部变率对 20 世纪中国年平均气温变化的贡献较之外强迫要大, 对中国的气温变化而言, 其强迫机制较全球平均情况要复杂.

开展自然强迫因子 (太阳辐射和火山活动) 和人为强迫因子 (温室气体和硫酸盐气溶胶) 分离的耦合模式敏感性试验, 比较自然因素和人为因子的气候影响及其异同点, 亦是国家自然科学基金重大项目《中国地区树轮及千年气候变化研究》之课题“中国千年气候变化数值模拟与机理研究”的一项主要研究内容^[14]. 利用 LASG 海气耦合模式进行的 20 世纪全强迫试验表明, 在自然和人为因子的共同强迫下, 模式能够合理再现 20 世纪全球、半球及大陆尺度的地表气温变化趋势^[15]. 但是, 在过去百年气温变化中, 自然因子和人为因子的相对贡献及其影响异同点, 尚需要通过自然因子和人为因子的分离强迫试验来进一步考察. 本文的目的, 是在此前工作基础上, 利用耦合模式进一步进行自然因子分离强迫的试验, 通过与全强迫试验结果的比较, 理解自然和

人为外强迫对 20 世纪气候变化的相对贡献,探讨外强迫及内部变率对区域尺度温度变化的相对影响.对上述问题的考察,亦是未来利用该模式开展千年气候变化机理研究的重要基础.

2 模式和方法介绍

LASG/IAP 快速耦合版本的气候系统模式 FGOALS_g1 使用模块化结构,采用 NCAR CCSM2 的耦合器 CPL5 将大气模式、海洋模式、陆面模式和海冰模式等四个模块进行耦合. FGOALS_g1 的大气部分为 LASG/IAP 发展的格点大气模式 GAMIL 的低分辨率版本,水平分辨率相当于 5.0° 经度 $\times 4.0^\circ$ 纬度,垂直方向采用 σ - p 混合坐标系,分为 26 层.物理过程参数化方案主要来自美国国家大气研究中心(NCAR)的大气模式 CAM2.海洋模式为 LICOM,它是对 LASG/IAP 第三代全球大洋环流模式 L30T63 的水平分辨率进行提高而形成的新版本,水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$,垂直方向为 30 层,其中 300 m 以上有 12 层.耦合模式的陆面和海冰分量分别采用 NCAR 发展的通用陆面模式 CLM 和海冰模式 CSIM.关于该耦合模式的介绍,详见文献[16].

本文在满文敏等^[15]的 20 世纪全强迫试验(ALL)基础上,进一步进行了自然因子强迫试验(NAT).两组耦合积分的初始场,均采用 1860 控制试验第 30 年 1 月 1 日的瞬时场.1860 控制试验是指将太阳辐照度、温室气体浓度等外强迫场固定为工业革命前水平而进行的耦合积分.全强迫试验采用的是“国际耦合模式比较计划”CMIP3 为 20C3M 模拟试验(简称 IPCC AR4 二十世纪气候模拟试验)提供的历史大气辐射强迫场,包括自然因子(太阳辐射、火山气溶胶)和人为因子(温室气体、硫酸盐气溶胶等),属于国际上通用的强迫因子,具有普遍性和合理性.自然因子试验的太阳辐射和火山气溶胶资料与全强迫试验相同,但不包括人为因子的影响.图 1 给出各强迫因子的有效辐射效应,可以看出,1950 年以后的自然变率变化不大,而人为因子变化显著.两组试验的完全耦合积分均进行了 145 模式年,模拟的是 1860~2004 年的气候演变,本文选取第 22~141 模式年(即 1881~2000 年)的逐月积分结果进行分析.

为验证模式结果,本文使用的全球温度资料为 HadCRUT3v^[17],其水平分辨率为 5.0° 经度 $\times 5.0^\circ$ 纬度,时间跨度为 1850 年 1 月至 2006 年 2 月.中国

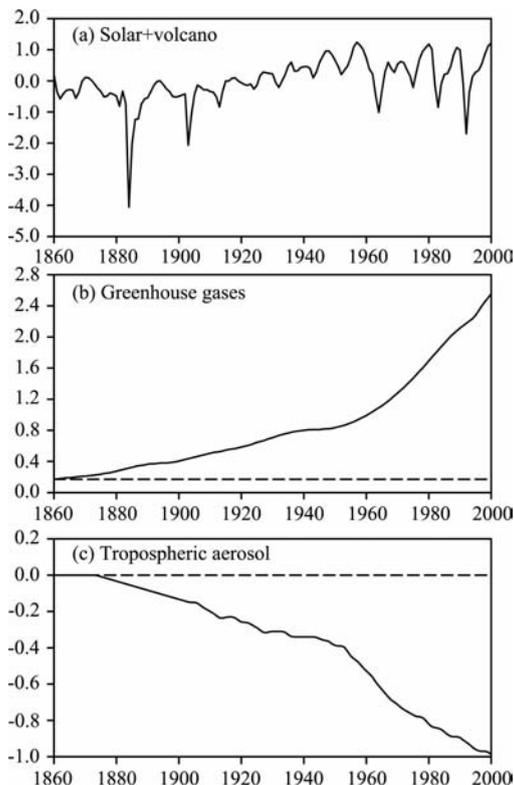


图 1 模式各强迫因子的有效辐射效应(单位: $W \cdot m^{-2}$)

(a) 太阳辐射+火山活动, (b) 温室气体, (c) 硫酸盐气溶胶.

Fig. 1 The radiative effects of external forcings used for driving the climate model ($W \cdot m^{-2}$)

(a) Solar irradiance + volcanic activity, (b) Greenhouse gases (solid line, all forcing run; dashed line, natural forcing run), (c) Tropospheric aerosol (solid line, all forcing run; dashed line, natural forcing run).

区域 1951~2000 年的观测序列来自中国气象局提供的 160 站观测资料,1881~1950 年的气温资料来自王绍武等^[18]的重建资料,其序列利用了 50 个站的资料,分为 10 个区,每个区 5 个站,1951 年之前有观测用观测资料,没有观测用代用资料(详见王绍武等^[18]的文章原文);1951 年之后,用 50 个站与用 700 个站、乃至 2000 个站做出来的中国区域平均温度序列的相关系数高达 0.99.通过与全球温度资料 HadCRUT3v 在中国地区区域平均结果的对比,表明该序列可以较为真实地反映中国百年的温度变化,可以用于模拟结果的检验.

本文将两组试验各自与观测序列的相关系数的平方,代表其各自方差贡献.

3 结果分析

3.1 全球平均气温距平随时间的演变

图 2 给出 1881~2000 年全球平均气温距平随

时间的演变(相对于 1961~1990 年平均值). 在自然和人为因子的共同强迫下,模式能够较好地再现 20 世纪气温的演变过程,包括 1910~1940 年的变暖、1940~1970 年的微弱变冷、以及 1970 年以后的变暖. 模拟和观测的相关系数达到 0.76,通过了 5% 显著性检验. 仅在自然因子强迫下,模式可以合理再现 1910~1940 年的变暖及 1940~1970 年的微弱变冷,但无法再现 1970 年以后的变暖. 人为因子影响的分析表明,人为因素对 1970 年以前的气温变化没有显著贡献,但对 1970 年以后增温作用明显. 说明自然因素对 20 世纪第一次变暖的作用是显著的,但温室气体是 20 世纪后期变暖的主要原因. 值得注意的是,无论是全强迫试验还是自然因子试验,模拟的全球平均气温序列在年际变率上与观测结果差别较大. 这是因为全球平均温度序列年际变化的很大一部分来自 ENSO 的影响,而在 20 世纪模拟试验中,模式模拟的 ENSO 和实际观测在时间上基本没有对应关系^[19].

表 1 给出对应于近百年气温变化三个特征时段的气温线性趋势. 1911~1940 年,全球平均的线性趋势是增加的,观测结果为 0.36 °C/30a,全强迫试验的气温变化趋势是 0.29 °C/30a,自然因子试验的线性趋势为 0.26 °C/30a. 可见,对于 20 世纪第一次增暖,全强迫试验及自然因子试验均可以合理再现观测的气温变化趋势,尽管强度均较观测略微偏弱. 1941~1970 年,观测与模拟的气温变化趋势均表现出微弱的变冷趋势,自然因子试验的变冷趋势较观测稍强. 1970 年以后,观测的地表气温上升趋势为 0.48 °C/30a,全强迫试验的上升趋势为 0.34 °C/30a,略低于观测,而自然因子试验的线性趋势只有 -0.06 °C/30a,模式显然无法再现 20 世纪后期的全球变暖. 上述分析表明,自然因素在 20 世纪早期的增暖中居主导地位,而人类活动是 20 世纪后期温度变化的主要原因.

表 1 近百年气温变化的三个时段全球平均气温的线性趋势(°C/30a)

Table 1 Global mean liner air temperature trends during the three typical periods of the twentieth-century (°C/30a)

	观测	全强迫试验	自然因子试验
1911~1940	0.36	0.29	0.26
1941~1970	-0.07	-0.02	-0.15
1971~2000	0.48	0.34	-0.06

3.2 纬向平均气温距平随时间的演变

图 3 给出纬向平均气温距平随时间的演变(相对于 1961~1990 年平均值). 观测资料显示,20 世纪发生了两次变暖:第一次发生在 1910~1940 年,第二次发生在 1980 年以后,增温幅度最强的区域位于北半球中高纬度地区(30°N 以北)(图 3a). 全强迫试验结果与观测基本一致,分别在 1910~1940 年和 1980 年以后发生两次变暖,但增暖的范围和幅度均较观测偏小(图 3b). 在自然因子作用下,模式能够合理再现 1910~1940 年的第一次变暖,但无法再现 1980 年以后的剧烈增温(图 3c). 人为因子对 20 世纪第一次变暖的作用不明显,但对 1980 年以后的增温具有显著贡献(图 3d). 纬向平均气温变化的结果亦表明,自然变率对 20 世纪早期变暖的贡献很大,而第二次变暖主要是温室气体增加的结果,这与此前的耦合模拟试验相一致^[8-12].

3.3 近 50 年及近百年气温变化趋势分布

图 4 给出近 50 年(1949~2000 年)及近百年(1901~2000 年)全球气温变化趋势分布. 1949~2000 年观测气温的变化趋势(图 4a)表明,北半球中高纬度陆地区域具有显著的增暖趋势(2~4 °C/100a),印度洋/西太平洋暖池区、澳大利亚、赤道东太平洋以及南大西洋(30°S 以北)等区域增温幅度稍弱(1~2 °C/100a),而北太平洋、北大西洋北部、美国东南部、赤道非洲等区域的气温则呈下降趋势. 全强迫试验的结果表现为全球大部分地区气温上升(图 4c),但模拟的增温趋势较观测偏弱. 模式不能再现观测中北半球中高纬度陆地区域的强烈增温,印度洋/西太平洋暖池区、赤道东太平洋以及南大西洋的增温幅度亦小于观测. 此前的研究指出^[15],耦合模式对温室气体的响应敏感度较低是造成模拟的气温变化趋势偏弱的重要原因;此外,大气模式分量 GAMIL 自身的偏差可能亦有贡献. 对于自然因子试验(图 4e),除赤道太平洋、南大西洋具有弱的增温趋势外,全球大部分地区表现出弱的变冷趋势,包括亚洲大陆、印度洋/西太平洋暖池区、北太平洋、北大西洋北部、美国东南部及赤道非洲地区等. 人为因子影响的分析表明(图 4g),除北太平洋、北大西洋北部、美国东南部和欧洲地区气温呈下降趋势外,全球大部分地区表现出增温趋势,增温幅度与全强迫试验相当,说明人为因素在近 50 年全球气温趋势变化中居主导地位.

观测中 1901~2000 年全球气温的变化趋势(图 4b)与 1949~2000 年类似,除少数地区气温呈下降

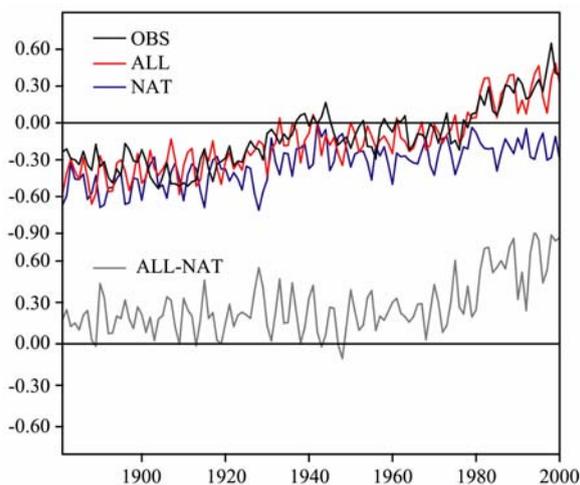


图2 全球平均气温距平随时间的演变
(相对于1961~1990年平均值)(单位:℃)

黑色实线为 HadCRUT3v 器测资料的结果,红色实线为全强迫试验结果(ALL),蓝色实线为自然因子试验结果(NAT),灰色实线为人为因子影响结果(ALL-NAT).

Fig. 2 Global annual mean air temperature time series for the observations (HadCRUT3v, black line) (°C) and model historical forcing runs

The red, blue and grey lines are anomalies for all-forcing run, natural-forcing run and the difference between all- and natural-forcing runs. All curves are referenced to the period 1961~1990.

趋势外,全球大部分地区以增温为主,但增温趋势在强度上弱于近50年.在自然因素和人为因子共同强

迫下,模式基本模拟出了全球大范围区域的变暖(图4d),但没有合理再现观测中少数区域的变冷趋势,如北太平洋、北大西洋北部及美国东南部地区.在自然因素作用下,除少数地区外,全球大部分地区气温变化呈下降趋势(图4f).人为因子作用的结果与全强迫试验相当(图4h),全球大部分地区表现为增温趋势,说明人为因素亦是近百年温度变化的主要原因.

3.4 自然增暖和人为增暖时期的趋势分布特征

上述分析表明,1911~1940年的增暖主要受自然因素作用,1971~2000年的增暖则为温室气体影响,因此本文将1911~1940年定义为自然增暖时期,而将1971~2000年定义为人为增暖时期.为考查自然增暖和人为增暖的区域特征,图5给出自然增暖时期(1911~1940年)和人为增暖时期(1971~2000年)全球气温变化趋势分布.观测中,1911~1940年全球气温呈增加趋势,除北太平洋地区外,北半球中高纬度地区增温趋势显著(图5a).1971~2000年观测气温的变化趋势表现为全球一致的增温,多数地区增暖趋势可达2~4℃/100a(图5b).在自然和人为因子共同作用下,1911~1940年的增暖表现为全球大部分地区气温增加,增温幅度较观测略微偏弱(图5c);对于1971~2000年的增暖,除欧洲、中国东部、北太平洋、北大西洋北部及美国东

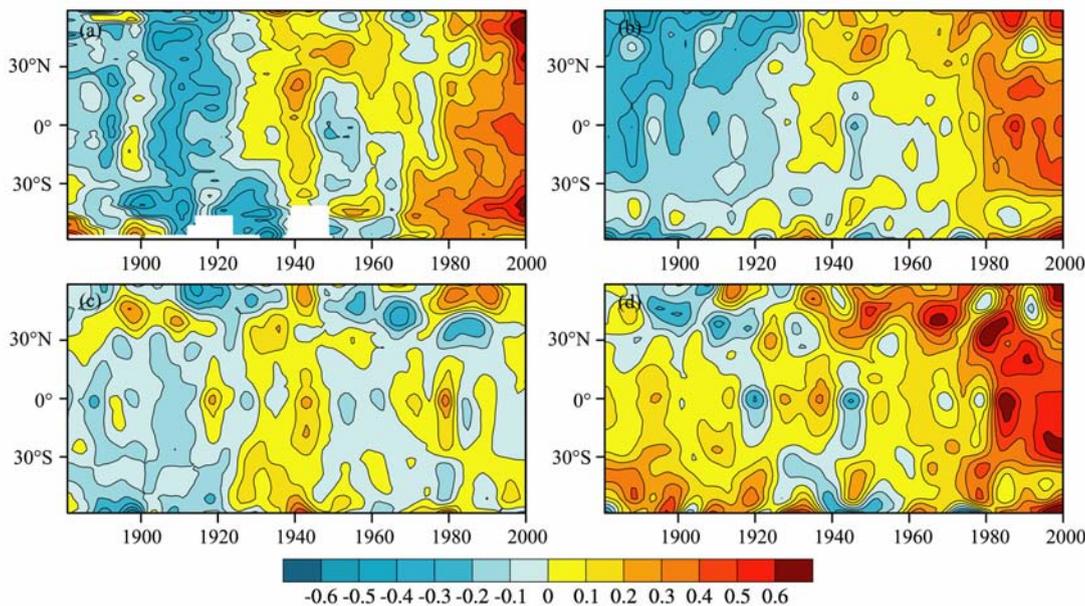


图3 观测和模拟的纬向平均气温距平随时间的演变(单位:℃)

(a) OBS, (b) ALL, (c) NAT, (d) ALL-NAT. 图3a, 3b 基于文献[15]重新绘制.

Fig. 3 The zonal mean air temperature from (a) the observation, (b) all-forcing run, (c) natural-forcing run, (d) difference between all- and natural- forcing runs (°C)

Figs. 3a, 3b are repeated from Ref. [15].

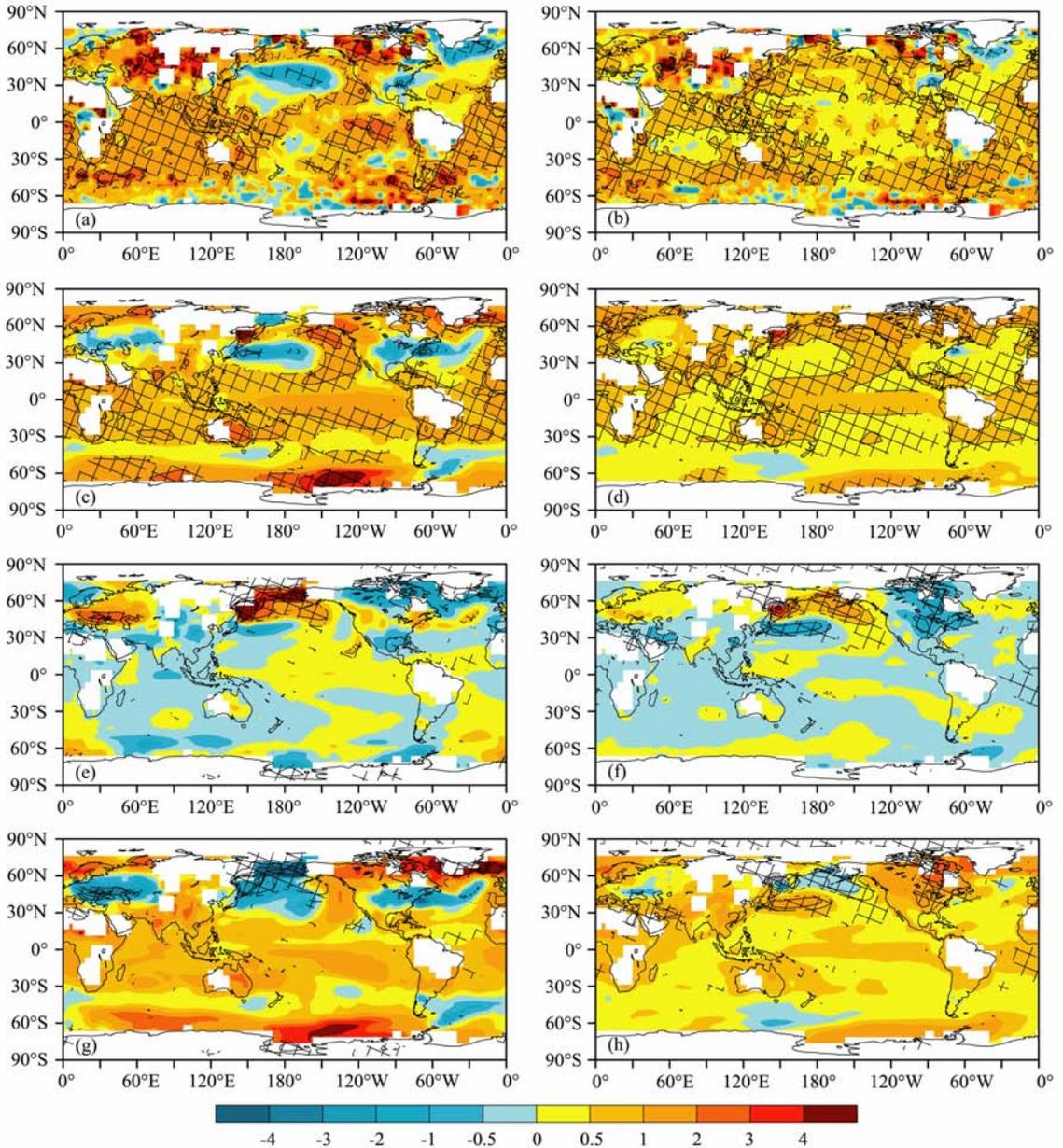


图 4 近 50 年及近百年全球气温的变化趋势($^{\circ}\text{C}/100\text{a}$)

(a) OBS(1949~2000 年), (b) OBS(1901~2000 年), (c) ALL(1949~2000 年), (d) ALL(1901~2000 年), (e) NAT(1949~2000 年), (f) NAT(1901~2000 年), (g) ALL-NAT(1949~2000 年), (h) ALL-NAT(1901~2000 年). 网格为通过 5% 显著性检验的区域,

图 4a—4d 基于文献[15]重新绘制.

Fig. 4 (a) Observed air temperature trends (1949~2000) in $^{\circ}\text{C}$ per 100a, (b) As in Fig. (a), but for 1901~2000, (c)-(d), As in Fig. (a) and (b), but for all-forcing run, (e)-(f), As in Fig. (a) and (b), but for natural-forcing run, (g)-(h), As in Fig. (a) and (b), but for difference between all- and natural- forcing runs. The shaded areas are statistically significant at the 5% level. Figs. 4a—4d are repeated from Ref. [15].

南部气温呈下降趋势外,全球大部分地区以增温为主,增温趋势在强度上大于 1911~1940 年的自然增暖,但依然较观测偏弱(图 5d). 在自然因素作用下,除赤道中东太平洋及其他小范围区域气温下降外,1911~1940 年的增暖表现为全球大部分地区气温上升,增温幅度与全强迫试验相当(图 5e);然而,对

1971~2000 年的增暖而言,除北美和大西洋北部地区气温增加外,其他地区则表现出显著的降温趋势(图 5f). 在人为因子作用下,1911~1940 年的增暖在印度洋/西太平洋暖池区、赤道中东太平洋表现为弱的增温趋势,其他地区则表现出弱的降温趋势(图 5g);对于 20 世纪后期的增暖而言,除北太平洋、北

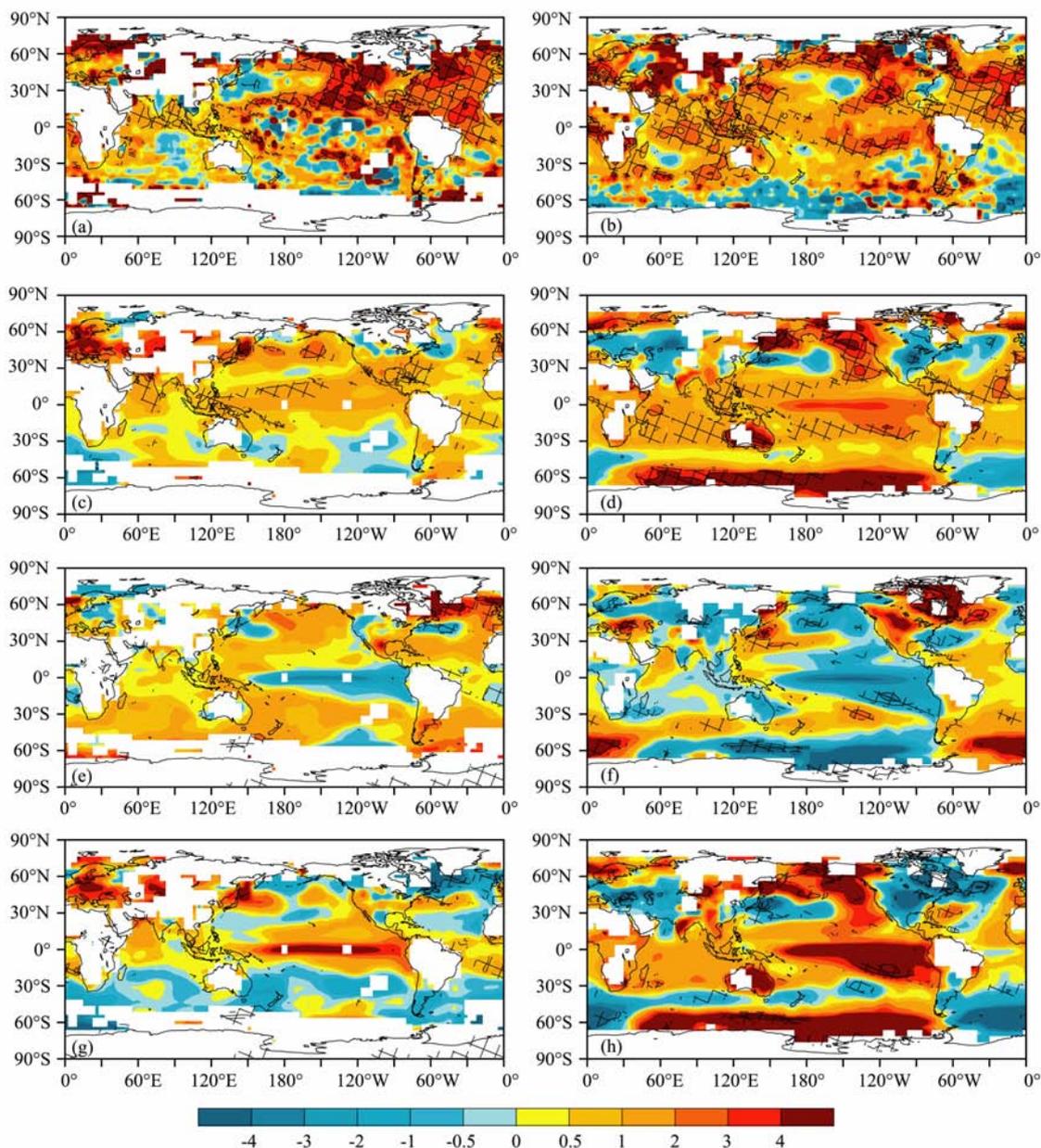


图5 同图4,但为自然增暖时期(1911~1940年)和人为增暖时期(1971~2000年)

Fig. 5 As in Fig. 4, but for the earlier warming period (1911~1940) and the later warming period (1971~2000)

美、北大西洋北部及南大西洋气温呈下降趋势外,全球大部分地区表现出显著的增温趋势(图5h)。以上分析表明,在自然和人为因子共同作用下,模拟的20世纪早期的增暖较后期人为增暖强度偏弱;自然因素对20世纪早期全球气温变化趋势分布具有重要贡献,而人为因子是20世纪后期人为增暖的决定性因素。

3.5 大陆尺度和半球尺度气温演变

为进一步考查自然因素和人为因子对大陆及半球尺度气温演变的相对贡献,图6给出观测和模拟的大陆及半球尺度气温演变序列,各序列均进行了10年的低通滤波。前文已经指出,在自然因素和人

为因子共同作用下,模式能够合理再现20世纪全球平均气温的演变;仅在自然因子强迫下,模式无法再现20世纪后期的全球变暖(图2)。方差分析表明,人为因素可以解释近百年全球平均气温变化的72.0%,自然变率则解释了13.4%,说明人为因素是造成近百年全球平均气温变化的主要原因。

图6a—6b给出观测与模拟的大陆平均及海洋平均气温演变,观测中,大陆尺度及海洋尺度气温变化趋势均与全球平均相一致,表现为1910~1940年温度增加、1940~1970年微弱变冷、以及1970年以后温度增加。在自然因素和人为因子共同作用下,模式能够合理再现近百年大陆尺度及海洋尺度气温的

演变;仅在自然因子强迫下,模式无法再现 1970 年以后陆地及海洋平均气温的剧烈上升.方差分析表明,人为因素可以解释近百年陆地平均气温变化的 76.6%,自然变率则解释了 7.4%;对于海洋平均气温变化,人为因子和自然变率分别解释了 70.2%和 1.6%,说明人为因素对近百年大陆及海洋尺度的气温变化起决定性作用.

对于北半球热带外和南半球热带外地区(图 6c—6d),在自然和人为因子的共同作用下,模式模拟的近百年气温变化趋势与观测较为一致,包括

1910~1940 年的增温、1940~1970 年的微弱降温及 1970 年以后的增温,观测与模拟的相关系数均达到 0.8 以上,通过了 5%显著性检验.在自然因素作用下,模式可以较好地再现 20 世纪的第一次变暖,但无法再现 20 世纪后期的增暖.方差分析表明,外强迫可以解释两个区域气温变化的 70%以上,内部变率的贡献则相对较小;此外,外强迫变化中人为因素的影响大于自然变率.

3.6 区域尺度气温演变

图 7 进一步给出观测和模拟的区域尺度气温演

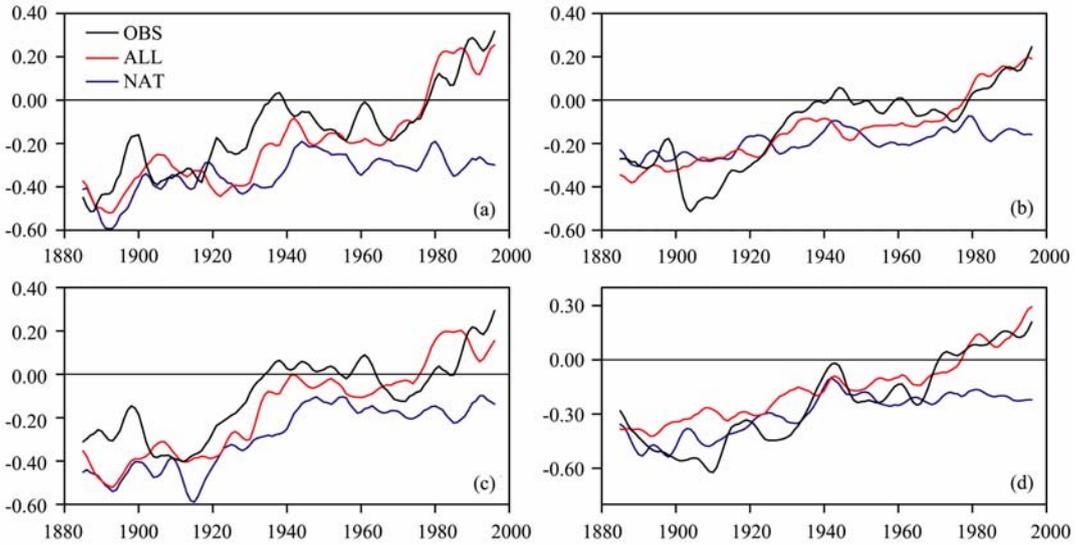


图 6 大陆尺度及半球尺度气温距平随时间的演变(相对于 1961~1990 年平均值)(单位:°C),每幅图通过 10 a 的低通滤波 (a) 全球陆地,(b) 全球海洋,(c) 北半球热带外地区(20°N—90°N),(d) 南半球热带外地区(20°S—90°S).

Fig. 6 Low-pass filtered area-averaged time series of air temperature anomalies (°C) relative to 1961~1990 for the land and hemispheric mean

(a) Global land, (b) Global ocean, (c) Northern Hemisphere extratropics (20°N—90°N), (d) Southern Hemisphere extratropics (20°S—90°S).

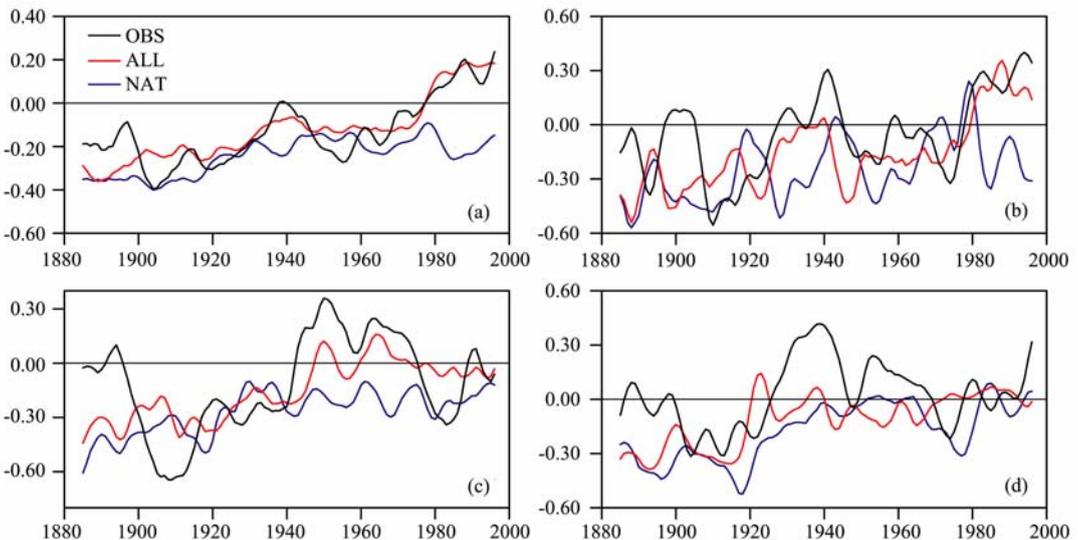


图 7 区域尺度气温距平随时间的演变(相对于 1961~1990 年平均值)(单位:°C),每幅图通过 10 a 的低通滤波 (a) 印度洋/西太平洋暖池区,(b) 热带东太平洋,(c) 北太平洋,(d) 北大西洋.

Fig. 7 Low-pass filtered area-averaged time series of air temperature anomalies(°C) relative to 1961~1990 over various regions (a) Indian Ocean/western Pacific warm pool, (b) Tropical East Pacific, (c) North Pacific, (d) North Atlantic.

变序列, 区域分布参照文献[15]的划分. 与全球、半球及大陆尺度的气温演变相一致, 过去 50 年印度洋/西太平洋暖池区亦发生显著的增温趋势 (图 7a). 在自然和人为因子共同强迫下, 模式能够较好地再现 20 世纪气温的演变, 模拟与观测的相关系数达到 0.7 以上; 仅在自然因子强迫下, 模式无法再现 20 世纪后期的增暖. 方差分析表明, 外强迫可以解释印度洋/西太平洋暖池区气温变化的 77.8%, 内部变率的贡献则为 22.2%, 说明人为因子影响是该地区气温变化的主导因素.

对于赤道东太平洋而言 (图 7b), 观测资料表现为 1910~1940 年气温上升、1950~1970 年气温下降、1970 年以后气温剧烈增加. 全强迫试验的气温变化趋势与观测较为一致, 模拟与观测的相关系数达到 0.78; 自然因子试验中气温变化表现出显著的年代际特征, 模式不能再现 1970 年以后的增温. 方差分析表明, 外强迫可以解释该地区近百年气温变化的 36.5%, 内部变率的贡献则高达 63.5%, 这可能是由于该地区受 El Nino 以及太平洋年代际振荡的影响, 导致气候系统内部噪声与外强迫信号的比值增大^[20].

对于北太平洋地区 (图 7c), 观测资料显示该地区气温变化存在显著的年代际振荡特征, 其峰值位相和谷值位相分别出现在 1940 年代和 1980 年代. 在自然和人为因子共同强迫下, 模式能够模拟出某些年代际位相变化, 例如位于 1940 年代的年代际变暖, 但是模式无法模拟出位于 1980 年代的年代际变化; 仅在自然因素作用下, 模式无法再现气温变化的年代际特征. 方差分析表明, 外强迫可以解释北太平洋地区气温变化的 55.2%, 而内部变率的贡献为 44.8%, 意味着外强迫作用 (包括自然和人为因子) 可能是引起北太平洋年代际变化的重要原因.

观测中北大西洋气温变化表现出显著的年代际变化特征 (图 7d), 无论是全强迫序列还是自然因子序列, 模拟的北大西洋气温变化均与观测的差别较大, 说明北大西洋的气温变化可能在很大程度上是气候系统内部自然振荡的结果^[21-22]. 方差分析表明, 外强迫可以解释北大西洋地区近百年气温变化的 25.4%, 内部变率的贡献高达 74.6%, 进一步说明气候系统内部变率是北大西洋气温变化的决定性因素.

以上分析表明, 无论是全球、半球、还是大陆尺度气温变化, 自然因素对 20 世纪第一次变暖的作用是显著的, 而温室气体在 20 世纪后期的变暖中居主

导地位. 方差分析结果表明, 除赤道中东太平洋和北大西洋外, 人为因素对近百年的增暖起决定性作用. 对全球、半球及大陆尺度而言, 外强迫可以解释平均气温变化的 70% 以上, 而内部变率贡献较小; 但对于区域尺度而言, 多数地区内部变率的贡献大于外强迫, 说明区域尺度气温变化的机制较全球、半球尺度要复杂很多. 需要指出的是, 文中方差分析仅仅是 FGOALS_g1 单个模式的结果, 不排除此结果可能具有模式依赖性.

3.7 中国地区气温演变

观测和模拟的中国地区气温演变如图 8 所示, 观测资料表现为 1910~1940 年的增暖, 1940~1970 年的变冷、以及 1970 年以后的增暖, 1940 年以前的增温幅度与 20 世纪后期相当. 全强迫试验的气温变化趋势与观测基本一致, 1950 年以前的增温幅度小于观测. 模拟和观测序列间的相关系数为 0.57, 通过了 5% 显著性检验. 自然因子试验能够合理再现 1940 年以前的增温, 但依然无法再现 1970 年以后的增温. 在人为因素作用下, 1970 年以前气温无明显变化, 1970 年以后则显著增温. 方差分析表明, 近百年变化中, 自然因素和人为因素的贡献分别为 17.4% 和 47.4%. 值得注意的是, 无论全强迫试验还是自然因子试验, 均不能成功再现 1920 年代中国区域的增温, 但目前尚不能排除中国 1920s 的增暖

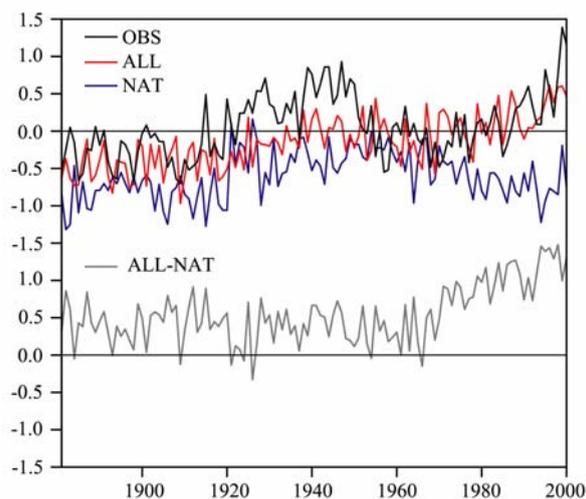


图 8 中国地区年平均气温距平随时间的演变

(相对于 1961~1990 年平均值) (单位: $^{\circ}\text{C}$)

1951~2000 年的观测序列来自中国气象局提供的 160 站观测资料, 1881~1950 年的气温资料来自王绍武等^[18]的重建结果. Fig. 8 As in Fig. 2 except for that averaged over China. The observed curves are compiled of the 160 station data from China Meteorological Administration (CMA) for 1951~2000 and the reconstruction data from Wang et al.^[18] for 1881~1950.

是重建资料的不确定性导致的虚假信号^[23].

图 9 给出 1949~2000 年以及 1901~2000 年中国地区气温的变化趋势分布. 观测中,近 50 年及近百年中国东部大部分地区具有增温趋势,增温幅度

约 0.5 °C/100a. 在自然因素和人为因子的共同作用下,模式可以合理再现两个时段中国东部地区的增温趋势,增温幅度亦与观测较为接近. 自然因素对中国地区的变暖贡献较小,在自然因子作用下,中国东

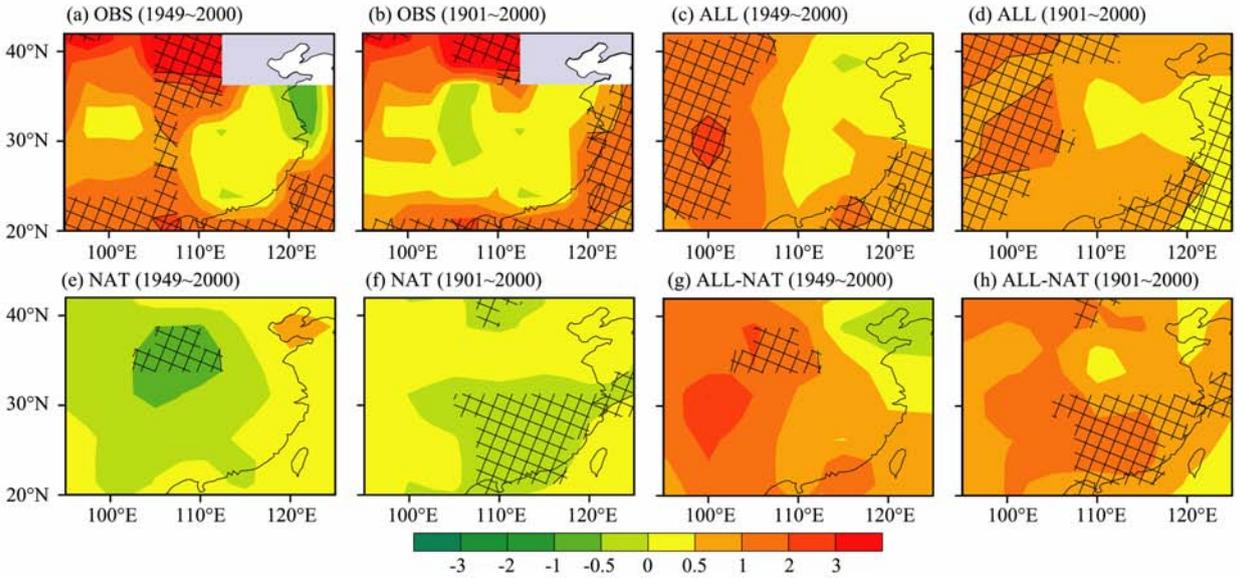


图 9 同图 4,但为中国地区气温的变化趋势
Fig. 9 As in Fig. 4 except for that over China

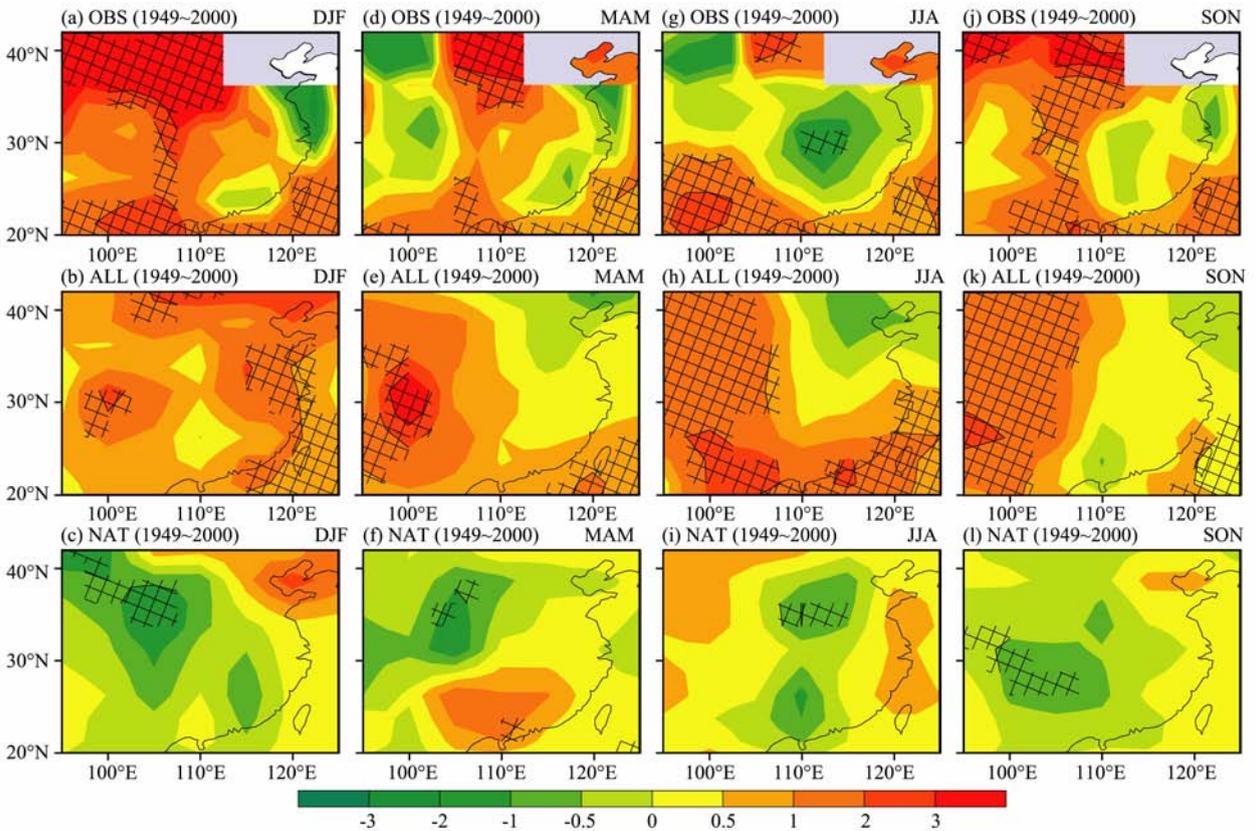


图 10 中国地区近 50 年气温变化季节演变情况
(a-c) DJF, (d-f) MAM, (g-i) JJA, (j-l) SON.

Fig. 10 Air temperature trends (1949~2000) over China for separate seasons in °C per 100a

部大部分地区具有变冷趋势. 人为因素对近 50 年及近百年中国东部具有显著的增温贡献.

图 10 进一步考察近 50 年(1949~2000 年)中国东部气温变化趋势在不同季节的分布. 观测资料显示, 中国东部气温变化存在明显的季节特征, 冬季增温显著, 春季除华南地区有一定降温趋势外, 其他地区呈增温趋势, 夏季包括华东和华中的长江中下游地区、淮河流域气温均有一定下降趋势, 秋季除中部少数区域外, 其他大部分地区气温增加, 这与前人的研究结论相一致^[24-25]. 在自然和人为因素共同作用下, 增暖趋势在冬季达到最大, 春季除北方地区有一定降温趋势外, 其他地区呈增温趋势, 但增温幅度减弱, 模式没有合理再现夏季长江中下游地区及淮河流域的降温趋势. 自然因子试验的结果表明, 太阳活动对该区域的变冷有贡献, 意味着自然变率对中国东部气候具有影响, 但模式无法再现该地区气温变化的季节差异. 关于中国东部地区夏季变冷的机制, 目前争议较大^[3, 26-27], 可能的影响因子包括大西洋的强迫作用^[28]、热带大洋增暖的强迫作用^[29]、以及硫酸盐气溶胶浓度的增加的影响^[30]. 目前一般认为, 它是东亚夏季风年代际减弱的区域体现^[31].

4 结论和讨论

本文利用 LASG/IAP 全球“海-陆-气-冰”耦合的气候系统模式 FGOALS_gl, 通过开展耦合模式敏感性试验, 模拟了 20 世纪气候, 讨论了自然变率和人为因素对全球、半球、大陆及区域尺度气温变化的相对贡献, 主要结论如下:

(1) 在自然和人为因素的共同强迫作用下, 模式能够成功再现 20 世纪全球及纬向平均气温的演变; 仅在自然因子强迫下, 模式可以合理再现 1910~1940 年的变暖及 1940~1970 年的微弱变冷, 但无法再现 1970 年以后的变暖; 在人为因素作用下, 1970 年以前气温无明显变化, 1970 年以后显著增温.

(2) 全球气温变化趋势的空间分布表明, 在自然因素和人类活动的共同作用下, 模式可以合理再现近 50 年及近百年气温变化趋势分布, 但增温幅度较观测偏弱; 在自然因子作用下, 全球大部分地区表现出变冷趋势. 自然因素对 20 世纪早期全球气温变化趋势具有重要贡献, 而人为因子是 20 世纪后期全球气温变化趋势的决定性因素.

(3) 方差分析表明, 除赤道中东太平洋和北大西洋外, 人为因素对近百年的增暖起决定性作用; 对全

球、半球及大陆尺度而言, 外强迫可以解释平均气温变化的 70% 以上, 而内部变率贡献较小; 但对于区域尺度而言, 多数地区内部变率的贡献要大于外强迫, 区域尺度温度变化的机制较全球、半球尺度要复杂.

(4) 对中国地区而言, 20 世纪早期的气温变化有受到自然因子影响的迹象, 但 20 世纪后期的变暖主要受温室气体影响. 中国东部气温变化的空间分布表明, 自然因素对近 50 年及近百年中国地区的变暖趋势贡献较小. 在自然和人为因子共同强迫作用下, 模式基本能够再现近 50 年中国东部气温变化冬春两季增暖的特征, 但没有模拟出夏季长江中下游地区及淮河流域的降温趋势; 自然因子试验的结果表明, 太阳活动对该区域的变冷有贡献, 但模式无法再现气温变化的季节特征.

最后应该指出的是, 海气耦合模式是开展 20 世纪气候变化机理的重要工具, 但是, 本文的结果仅仅是 FGOALS_gl 单个气候模式的结果, 目前的耦合版本对 20 世纪气候演变的模拟能力尚存在很多不足, 模式物理过程还存在诸多需要改进之处, 因此, 不排除此结果可能具有模式依赖性. 此外, 本文的研究是基于单个试验的结果, 这给归因模拟带来的不确定性亦需要高度关注, 未来的工作有必要开展集合模拟研究.

参考文献(References)

- [1] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. // Solomon S D, Qin M, Manning Z eds. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] 周天军, 王绍武, 张学洪. 大洋温盐环流与气候变率的关系研究: 科学界的一个新课题. 地球科学进展, 2000, 15(6): 654-660.
Zhou T J, Wang S W, Zhang X H. Comments on the role of thermohaline circulation in global climate system. *Advances in Earth Sciences* (in Chinese), 2000, 15(6): 654-660.
- [3] 周天军, 李立娟, 李红梅等. 气候变化的归因与预估模拟研究. 大气科学, 2008, 32(4): 906-922.
Zhou T J, Li L J, Li H M, et al. Progress in climate change attribution and projection studies. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2008, 32(4): 906-922.
- [4] Scaife A A, Kucharski F, Folland C K, et al. The CLIVAR C20C Project: selected twentieth century climate events. *Clim. Dyn.*, 2009, 33(5): 603-614, doi: 10. 1007/ s00382-008-0451-1.
- [5] Kucharski F, Scaife A A, Yoo J H, et al. The CLIVAR C20C project: skill of simulating Indian monsoon rainfall on

- interannual to decadal timescales. Does GHG forcing play a role? *Clim. Dyn.*, 2009, 33(5): 615-627, doi: 10. 1007/s00382-008-0462-y.
- [6] 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. *Meteorologische Zeitschrift*, 2009, 18(4): 455-467.
- [7] 李立娟, 王斌, 周天军. 外强迫因子对 20 世纪全球变暖的综合影响. *科学通报*, 2007, 52(15): 1820-1825.
Li L J, Wang B, Zhou T J. Influences of external forcings on the 20th century global warming. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2007, 52(15): 1820-1825.
- [8] Tett S F B, Stott P A, Allen M A, et al. Causes of twentieth century temperature change near the Earth's surface. *Nature*, 1999, 399(6736): 569-572.
- [9] Stott P A, Tett S F B, Jones G S, et al. External control of 20th century temperature by natural and anthropogenic forcings. *Science*, 2000, 290(5499): 2133-2137.
- [10] Meehl G A, Ammann C M, Arblaster J M, et al. Combination of natural and anthropogenic forcings and twentieth-century climate. *J. Climate*, 2004, 17: 3721-3727.
- [11] Stouffer R J, Manabe S, Vinnikov K Y. Model assessment of the role of natural variability in recent global warming. *Nature*, 1994, 367(6464): 634-636.
- [12] Santer B D, Taylor K E, Wigley T M L, et al. Human effect on global climate? *Nature*, 1996, 384: 522-524.
- [13] 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.
- [14] 周天军, 满文敏, 张洁. 过去千年气候变化的数值模拟研究进展. *地球科学进展*, 2009, 24(5): 469-476.
Zhou T J, Man W M, Zhang J. Progress in numerical simulations of the climate over the last millennium. *Advances in Earth Science* (in Chinese), 2009, 24(5): 469-476.
- [15] 满文敏, 周天军, 张洁等. 气候系统模式 FGOALS_gl 模拟的 20 世纪温度变化. *气象学报*, 2011, 69(4): 644-654.
Man W M, Zhou T J, Zhang J, et al. The 20th century climate simulated by LASG/IAP climate system model FGOALS_gl. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 2011, 69(4): 644-654.
- [16] Zhou T J, Wu B, Wen X Y, et al. A fast version of LASG/IAP climate system model and its 1000-year control integration. *Adv. Atmos. Sci.*, 2008, 25(4): 655-672.
- [17] Brohan P, Kennedy J J, Harris I, et al. Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: a new data set from 1850. *J. Geophys. Res.*, 2006, 111: D12106, doi:10. 1029/2005JD006548.
- [18] 王绍武, 叶瑾琳, 龚道溢等. 近百年中国年气温序列的建立. *应用气象学报*, 1998, 9(4): 392-401.
Wang S W, Ye J L, Gong D Y, et al. Construction of mean annual temperature series for the last one hundred years in China. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 1998, 9(4): 392-401.
- [19] Dai A G, Wigley T M L, Boville B A, et al. Climates of the 20th and 21st centuries simulated by NCAR Climate System Model. *J. Climate*, 2001, 14: 485-519.
- [20] Knutson T R, Delworth T L, Dixon K W, et al. Assessment of twentieth-century regional surface temperature trends using the GFDL CM2 coupled models. *J. Climate*, 2005, 19: 1624-1651.
- [21] 周天军. 全球海气耦合模式中热盐环流对大气强迫的响应. *气象学报*, 2003, 61(2): 164-179.
Zhou T J. Adjustment of the North Atlantic thermohaline circulation to the atmospheric forcing in a global air-sea coupled model. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 2003, 61(2): 164-179.
- [22] 周天军, Helge D. 卑尔根气候模式中大西洋热盐环流年代际与年际变率的气候影响. *大气科学*, 2005, 29(2): 167-177.
Zhou T J, Helge D. Climate impacts of the decadal and interannual variability of the Atlantic thermohaline circulation in Bergen climate model. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, 29(2): 167-177.
- [23] Wang S W, Gong D Y. Enhancement of the warming trend in China. *J. Geophys. Res.*, 2000, 27(16): 2581-2584.
- [24] 濮冰, 闻新宇, 王绍武等. 中国气温变化的两个基本模态的诊断和模拟研究. *地球科学进展*, 2007, 22(5): 456-467.
Pu B, Wen X Y, Wang S W, et al. Diagnostic and modeling study of the two basic modes of surface air temperature and its variation in China. *Advances in Earth Science* (in Chinese), 2007, 22(5): 456-467.
- [25] 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(6): 942-956.
Ren G Y, Guo J, Xu M Z, et al. Climate changes of China's mainland over the past half century. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 2005, 63(6): 942-956.
- [26] Yu R C, Zhou T J. Seasonality and three-dimensional structure of interdecadal change in the East Asian monsoon. *J. Climate*, 2007, 20(21): 5344-5355.
- [27] 宇如聪, 周天军, 李建等. 中国东部气候年代际变化三维特征的研究进展. *大气科学*, 2008, 32(4): 893-905.
Yu R C, Zhou T J, Li J, et al. Progress in the studies of three-dimensional structure of interdecadal climate change over eastern China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2008, 32(4): 893-905.
- [28] Hu Z Z, Yang S, Wu R G. Long-term climate variations in China and global warming signals. *J. Geophys. Res.*, 2003, 108(D19): 4614, doi: 10. 1029/2003JD003651.
- [29] Li H M, Dai A G, Zhou T J, et al. Responses of East Asian summer monsoon to historical SST and atmospheric forcing during 1950~2000. *Clim. Dyn.*, 2010, 34(4): 501-514, doi: 10. 1007/s00382-008-0482-7.
- [30] Qian Y, Giorgi F. Interactive coupling of regional climate and sulfate aerosol models over eastern Asia. *J. Geophys. Res.*, 1999, 104(D6): 6477-6499.
- [31] Zhou T J, Wu B, Scaife A A, et al. The CLIVAR C20C Project: Which components of the Asian-Australian monsoon circulation variations are forced and reproducible? *Clim. Dyn.*, 2009, 33(7-8): 1051-1068.