

不同温室气体排放情景下中国 21 世纪 地面气温和降水变化的模拟分析*

许吟隆¹⁾ 薛峰²⁾ 林一骅²⁾

1) (中国农业科学院农业气象研究所, 北京 100081)

2) (中国科学院大气物理研究所大气科学与地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029)

摘 要 利用 HadCM2 模式的模拟结果, 比较了温室气体排放综合效果相当于 CO₂ 浓度逐年递增 1% 和 0.5% 两种不同情景下, 中国区域 21 世纪地面气温和降水量的变化趋势。结果表明, 随着温室气体浓度的持续增加, 中国地面气温也持续升高。到 21 世纪末期, 地面气温在上述两种排放情景下可分别升高约 5 °C 和 3 °C。两种排放情景的增温趋势对比表明: 即使从 1990 年开始温室气体等效排放逐年递增率减少一半, 增温仍然很明显; 直到 21 世纪中期, 才能显示出减少温室气体排放量对减缓增温趋势的效果。降水量的年际变化较大, 但随着温室气体浓度的持续增加, 降水量总的趋势也是增加的。减排温室气体对降水量变化趋势的影响与地面气温相似。此外, 地面气温增量和降水量变化百分率均显示出明显的季节变化, 地面气温增量在秋、冬季较大而在春、夏季较小, 降水变化百分率在夏、秋季较小而在冬、春季较大。

关键词: 温室气体; 排放情景; 地面气温; 降水

p4 A

1 引言

自工业革命以来, 以煤和石油为主的能源消耗逐年增加, 随之大气中温室气体的浓度也不断增加, 例如, 大气中 CO₂ 的体积分数已从工业革命前的 279×10^{-6} 增加到现在的 355×10^{-6} 。近年来, 由于人类活动产生的温室气体浓度增加所引起的气候变化受到各国政府、科学家和企业界的广泛关注。自 20 世纪 80 年代以来, 科学家对这一问题进行了大量研究, 得到了温室气体浓度增加可引起全球气候变暖的结论^[1]。

中国是全球环境的一个重要组成部分, 在全球气候变暖的背景下, 中国的区域气候也会发生相应的变化。中国是一个农业大国, 气候变化对农业生产有着重要的影响, 因此研究温室气体排放持续增加引起的中国区域气候变化具有重要的意义。我国科学家对此做了大量研究, 得到了许多有意义的结果^[2~9]。然而, 温室气体引起的气候变化是一个复杂的科学问题, 还存在许多不确定性, 其中最重要的就是未来温室气体增加趋势的不确定性。在大多数的模拟试验中, 为简单起见, 均假定 CO₂ 的浓度每年以固

2001-07-12 收到, 2002-07-23 收到修改稿。

* 国家科技攻关 2001-BA611B-02-01 专题和国家留学回国人员启动基金“我国西部地区未来气候变化情景及其对农业影响评价方法研究”共同资助

2003/06/10 14:10:10

定速率等比增加(一般假定为1%),而没有考虑到未来采取减排措施对CO₂及其他温室气体浓度增加趋势的影响。有鉴于此, Hadley气候预测与研究中心利用 HadCM2 模式^[10~12],模拟了温室气体排放综合效果相当于CO₂的浓度(以下简称相当CO₂浓度)每年递增1%和0.5%两种排放情景下,温室气体浓度增加引起的全球气候变化。本文在利用实测资料进行模式验证的基础上,对比分析 HadCM2 模式模拟的两种不同排放情景下中国区域地面气温和降水的变化,以期对温室气体浓度增加引起的中国区域气候变化有更全面的认识。

2 模式简介与验证

HadCM2 是 Hadley 中心近年发展的一个海气耦合模式,其中大气模式水平分辨率为 $2.5^{\circ}\times 3.75^{\circ}$,垂直方向为19层,海洋模式的水平分辨率与大气模式相同,垂直方向分为20层,有关该模式的详细说明可参阅文献^[10~12]。

模式模拟的开始时间为1860年,情景预测至2099年,共模拟了240年时间。在模拟过程中,1860~1989年温室气体排放采用历史实测资料;自1990年起采用IS92a和IS92d两种温室气体排放情景,其中IS92a为相当CO₂浓度逐年递增1%(即不考虑减排措施),而IS92d则为相当CO₂浓度逐年递增0.5%(即考虑减排措施)。同时给出不同起始模拟条件的4组集合模拟结果,即首先利用 HadCM2 进行1000年的控制模拟试验,任取其中一年作为第1组集合模拟的初始状态,然后取每隔250年作为后3组集合模拟的初始状态,共有4组集合。

耿全震等^[3]曾分析了 HadCM2 模式对中国区域气候的模拟结果,证实该模式能够较好地模拟出中国区域各季地面气温和降水的分布特征。Johns^[11]等的分析结果表明,该模式模拟的全球地面气温在CO₂浓度倍增时将增加2.5℃,比大多数模式的模拟结果要略低一些。图1、2分别绘出了全国215个观测站1961~1990年30年平均地面气温和降水量的观测值(图1a、2a)和 HadCM2 模式模拟结果与观测值的差值(图1b、2b)的分布。从图1b可以看出 HadCM2 模式在青藏高原的大部分地区和黄土高原等区域模拟的气温偏低比较明显,喜马拉雅山区域明显偏高,而其他大部分地区显示出模拟误差在±2℃范围内,模式的模拟结果与观测值符合较好。图2b显示出模式在东北平原、华北平原及内蒙古和西北沙漠地带模拟效果较好,模拟误差在±0.5 mm d⁻¹以内;四川盆地、广西沿海和海南岛等区域模式模拟值明显偏低,青藏高原的南沿喜马拉雅山及其附近区域模拟值明显偏高,这与 HadCM2 模式的网格分辨率有关,即在有些区域网格不足以反映真实的水陆分布和地形特征。以上模拟结果与观测值的误差,需要更高分辨率的GCM和RCM进行改进。但从整体上看, HadCM2 模式较好地模拟了中国区域的地面气温和降水的分布特征。

3 模拟结果分析

图3a、b分别绘出了1961~2099年139年间模拟的中国区域年平均地面气温和降水量相对于1961~1990的变化趋势,其中1961~1995年的观测值取自CRU(Climatic

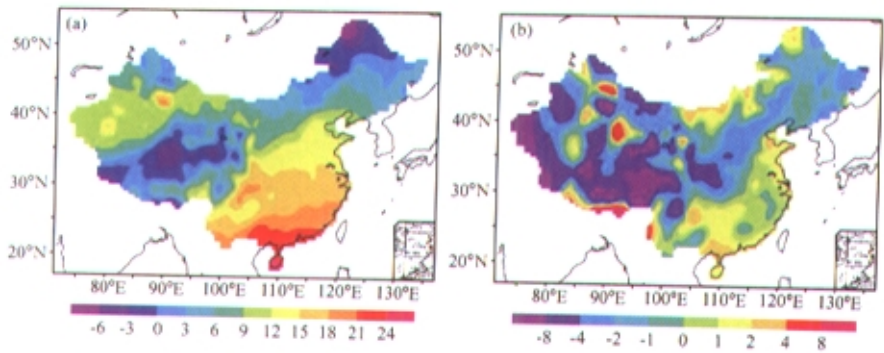


图 1 1961~1990 年 30 年平均地面气温 (单位: $^{\circ}\text{C}$) 观测值与 HadCM2 模拟结果的比较
(a) 215 台站观测值; (b) HadCM2 模拟结果减观测值的差值

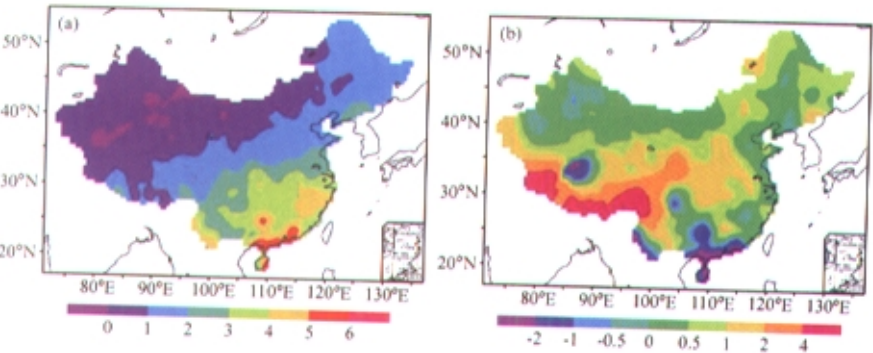


图 2 降水量 (单位: mm d^{-1}), 其余说明同图 1

Research Unit) 的再分析结果^[13]。从图 3a 可以看出, 在 1961~1995 年间, 模拟与观测结果较为一致, 总的趋势是地面气温逐渐升高。1995 年之后, 随着相当 CO_2 浓度的持续增加, 地面气温也不断升高。相对 4 个集合的平均值而言, 到 21 世纪末期, 在 IS92a 情景下可升高约 5°C , 在 IS92d 情景下也可升高约 3°C 。此外, 对比两种排放情景下的增温趋势可以看到, 即使从 1990 年开始采取减排措施, 其后的增温趋势仍然很明显, 直到 21 世纪中期, 才能明显地看到减少温室气体排放量对减缓增温趋势的效果。因此, 即使在采取温室气体减排措施之后, 中国仍然会在相当长的时间内承受较强的增温影响。

与地面气温相比, 观测和模拟均显示降水量的年际变化幅度较大 (图 3b), 但随着 CO_2 浓度的持续增加, 降水量的总趋势也是增加的。至 21 世纪末, 在 IS92a 和 IS92d 情景下, 平均降水量约分别增加 20% 和 10%。两种排放情景下的降水量变化趋势对比还显示, 在采取减排措施后, 到 21 世纪中期降水量的增加趋势才开始趋缓, 这与地面气温的变化趋势类似。

表 1 进一步给出了两种温室气体排放情景下 2010~2039 年 (2020s)、2040~2069

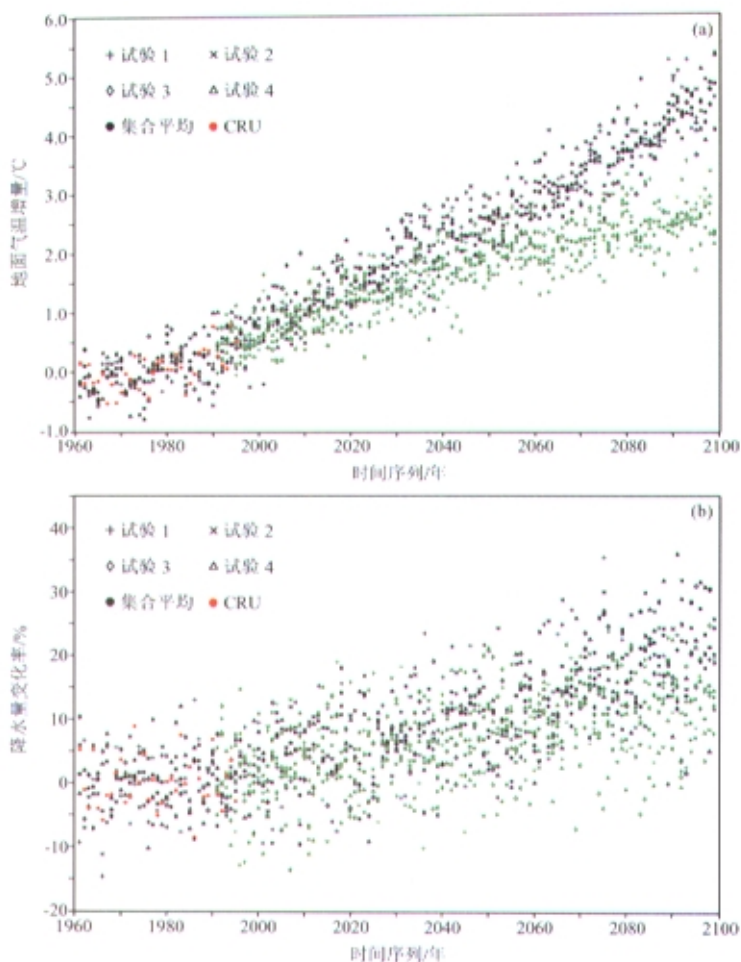


图3 IS92a和IS92d情景下HadCM2模拟的中国区域年平均地面气温和降水量相对于1961~1990的变化趋势
(a) 地面气温增量(°C); (b) 降水量变化率(%)

黑色和绿色分别为IS92a和IS92d情景下的模拟结果,红色为CRU的再分析结果

年(2050s)、2070~2099年(2080s)中国区域各30年平均地面气温增量和降水量变化百分率的年平均值。可以看出,与IS92a情景结果相比,在相当CO₂浓度排放年递增率减半情景下,2020s、2050s时段4个集合平均值的地面气温增幅减少仅有约25%,至2080s地面气温增幅的减少才可达约40%。降水量的变化与地面气温变化相似。

图4a、b、c分别是IS92a排放情景下模式模拟的2020s、2050s、2080s中国区域各30年平均的年平均地面气温增量和降水量相对于1961~1990年变化量的地理分布。可以看到,在3个不同时段,增温基本分布为北方大于南方,内陆大于沿海,其中尤以新疆最为显著,在华中地区有一明显的增温中心。而且随着温室气体浓度的持续增

表 1 HadCM2 模式模拟的相对于 1961~1990 年 30 年平均地面气温增量和降水量变化率

排放情景	模拟结果	地面气温增量/ $^{\circ}\text{C}$			降水量变化百分率/%		
		2020s	2050s	2080s	2020s	2050s	2080s
IS92a	集合 1	1.80	2.77	4.08	6.1	13.0	17.9
	集合 2	1.65	2.86	4.12	8.1	13.1	21.3
	集合 3	1.56	2.58	3.71	4.7	10.8	19.2
	集合 4	1.73	2.68	4.04	7.5	10.0	18.8
	平均	1.68	2.72	3.99	6.7	11.7	19.3
IS92d	集合 1	1.31	2.13	2.58	5.8	7.7	12.2
	集合 2	1.30	2.00	2.44	3.0	8.5	13.1
	集合 3	1.11	1.90	2.29	3.6	7.3	9.8
	集合 4	1.37	1.92	2.51	4.0	9.2	11.9
	平均	1.27	1.99	2.46	4.1	8.2	11.7

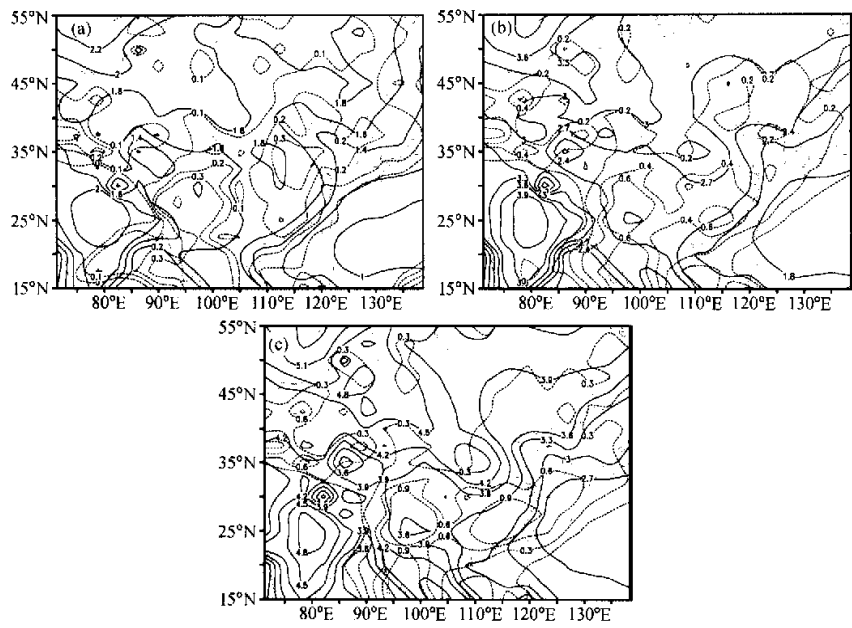


图 4 IS92a 情景下 HadCM2 模拟的相对于 1961~1990 年中国区域 30 年平均地面气温增量
(实线, 单位: $^{\circ}\text{C}$) 和降水量变化 (虚线, 单位: mm d^{-1}) 4 个集合平均值的地理分布
(a) 2020s; (b) 2050s; (c) 2080s

等值线间隔, 实线: (a) 为 0.2°C , (b)、(c) 为 0.3°C ; 虚线: (a)、(b)、(c) 分别为 0.1 、 0.2 、 0.3 mm d^{-1}

加, 地面气温也不断升高。以新疆为例, 上述 3 个时段的增温幅度可分别达到 1.8°C 、 3.0°C 和 4.5°C 以上, 而同期华南的增温仅为 1.5°C 、 2.4°C 和 3.3°C 。从降水量变化分布可以看出, 在 2020s 时段降水量增加主要集中在华北地区与长江中下游流域, 其中华北地区的降水量增幅最大 (0.3 mm d^{-1}); 而在其后的 2050s、2080s 时段, 长江中下游流域与华南地区降水量增加明显, 尤以华南地区降水增加最为显著。降水量的这种变化可能与全球变暖后大气环流的变迁有关。从图 5 可以看出, 在 IS92d 排放情景

下,上述各时段地面气温增量和降水量变化的空间分布与 IS92a 排放情景基本相似,但由于温室气体的减排,增温趋势有所减缓,同时降水增加量亦有所减少,这与图 1 中的变化趋势是一致的。

表 2 列出了 IS92a 和 IS92d 两种情景下 4 个集合模拟试验平均所得出的中国区域 30 年平均地面气温增量月平均值和降水量变化百分率的季度平均值。可以看出,2020s、2050s、2080s 3 个时段的增温均为秋、冬季较大,春、夏季较小,其中冬季增温最大而春季最小。就 4 个集合平均值的结果而言,在 IS92a 情景下上述 3 个时段增温最大的月份与最小月份之差分别可达到 0.6℃、1.0℃和 1.2℃,IS92d 情景下虽然极端值的

表 2 HadCM2 模式模拟的相对于 1961~1990 年中国区域 30 年平均地面气温增量的月均值和降水量变化率的季均值 (4 个集合平均)

排放情景	时段	地面气温增量/℃												降水量变化率/%			
		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	春季	夏季	秋季	冬季
IS92a	2020s	1.90	1.58	1.65	1.23	1.39	1.57	1.62	1.83	1.80	1.75	1.95	1.90	9.8	2.6	5.3	12.6
	2050s	2.89	2.60	2.40	2.49	2.34	2.57	2.56	2.97	2.95	2.82	3.29	2.80	16.7	3.0	14.0	21.4
	2080s	4.30	3.78	3.48	3.34	3.60	3.78	3.87	4.41	4.42	4.14	4.57	4.17	26.0	4.3	24.4	39.6
IS92d	2020s	1.49	0.93	1.14	1.15	1.16	1.20	1.35	1.49	1.37	1.22	1.55	1.24	6.4	0.4	5.5	7.4
	2050s	2.13	1.87	1.90	1.84	1.75	1.81	1.85	2.12	2.06	1.98	2.40	2.14	12.3	2.2	6.6	17.3
	2080s	2.48	2.23	2.17	2.16	2.15	2.36	2.38	2.81	2.66	2.65	2.68	2.74	16.7	2.3	13.6	24.6

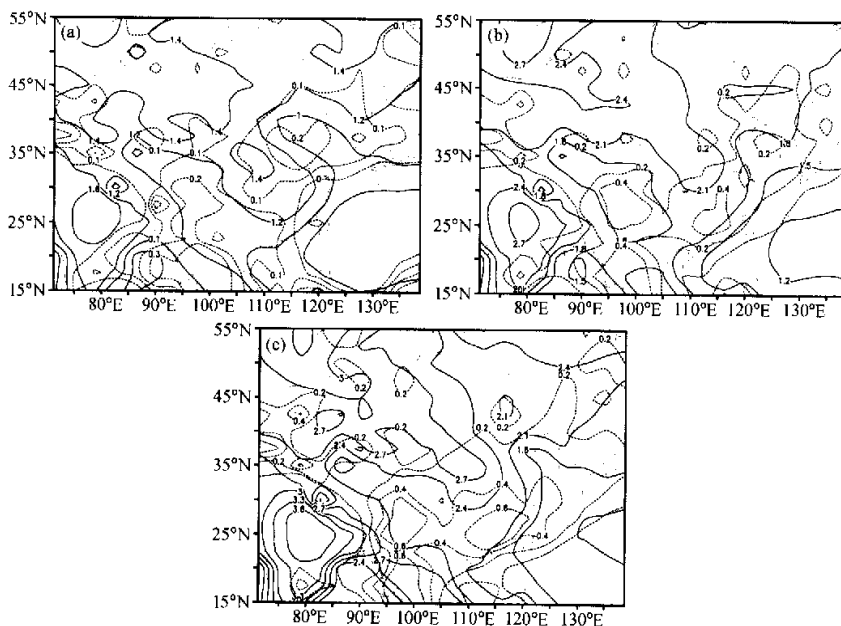


图 5 IS92d 情景, 其余说明同图 4

等值线间隔, 实线: (a) 为 0.2℃, (b)、(c) 为 0.3℃; 虚线: (a) 为 0.1 mm d⁻¹, (b)、(c) 为 0.2 mm d⁻¹

差别没有 IS92a 情景下的差别那样明显, 但也可以明显看出季节之间的差别是增大的。因此, 随着温室气体浓度的增加, 地面气温增量的年较差也不断增大。从降水量的百分率变化可以看出, 3 个时段的季节变化趋势基本相同, 即夏、秋季较小, 冬、春季较大, 其中冬季最大而夏季最小。与地面气温增量的季节变化类似, 降水量变化的年较差也随着温室气体浓度的增加而不断增大。

4 小结

本文利用 HadCM2 模式的模拟结果, 对比分析了在相当 CO_2 浓度逐年递增 1% 和 0.5% 两种情景下中国区域的气候变化, 主要得到如下一些结论:

(1) 利用全国 215 个观测站 1961~1990 年观测的地面气温和降水量 30 年平均值的結果, 对 HadCM2 模式模拟结果的验证表明, 模式较好地模拟了中国区域地面气温和降水的分布特征。

(2) 从 1961~2099 年共 139 年中国区域年平均地面气温增量的变化趋势可知, 随着温室气体浓度的持续增长, 地面气温也不断升高。而且, 即使从 1990 年起相当 CO_2 浓度逐年递增率减少一半, 其后的增温趋势仍很明显, 直到 21 世纪中期, 才能显示出减少温室气体排放量对减缓增温趋势的效果。降水量总的变化趋势也是不断增加, 但与地面气温相比, 其年际变化幅度较大。

(3) 两种排放情景下地面气温增量和降水量变化的地理分布大体相同, 即地面气温增量北方大于南方, 内陆大于沿海, 新疆和华中地区增温明显; 降水量增加在 2020s 时段主要集中在华北地区与长江中下游流域, 而在其后的 2050s、2080s 时段, 则主要集中在长江中下游流域与华南地区, 尤以华南地区降水增加最为显著。

(4) 地面气温增量和降水量变化率均显示出明显的季节变化, 气温增量在秋、冬季较大, 春、夏季较小, 而降水量变化率在冬、春季较大, 在夏、秋季较小。并且, 二者的年较差也随着温室气体的增加而增大。

本文的结果表明, 即使在采取温室气体减排措施的情景下, 中国也会在今后相当长的时期内承受由于温室气体排放所引起的气候变化影响, 这个结论值得重视。因此, 在全球气候变化的背景下, 有必须进一步加强中国区域气候变化的研究, 以便更加准确地评价未来气候变化的影响, 积极地采取切实可行的措施适应和减缓气候的变化。

致 谢 本文工作得到沈学顺博士的诸多帮助, 观测数据从国家气象中心资料室获得, 气候模式数据从 IPCC DDC 获得, 网站地址: <http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/>, 在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- 1 IPCC, *Climate Change 1992, The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment*, Houghton, J. T., B. A. Callander, and S. K. Varney, Eds., Cambridge University Press, 1992, 200pp.
- 2 王会军、曾庆存、张学洪, CO_2 含量加倍引起的气候变化的数值模拟研究, 中国科学 (B 辑), 1992, **35**, 663~672.
- 3 耿全震、丁一汇、陆尔、赵宗慈, Hadley 中心海—气耦合模式对中国未来区域气候变化情景的预测, 中国的

- 气候变化与气候影响研究, 丁一汇主编, 北京: 气象出版社, 1997, 440~448.
- 4 陈克明、张学洪、金向泽等, 一个海洋大气环流耦合模式及其控制试验和增强温室效应试验的初步分析, 气候变化规律及其数值模拟研究论文(第二集), 北京: 气象出版社, 1996, 61~84.
 - 5 俞永强、陈克明、金向泽等, 温室效应引起的全球气候变化, 气候变化规律及其数值模拟研究论文(第二集), 北京: 气象出版社, 1996, 138~147.
 - 6 宋玉宽、陈隆勋, 二氧化碳稳态倍增下的气候变化数值模拟, 气候变化规律及其数值模拟研究论文(第二集), 北京: 气象出版社, 1996, 228~240.
 - 7 王明星、杨昕, 人类活动对气候影响的研究 I. 温室气体和气溶胶, 气候与环境研究, 2002, 7 (2), 247~254.
 - 8 石广玉、王喜红、张立盛等, 人类活动对气候影响的研究 II. 对东亚和中国气候变化的影响, 气候与环境研究, 2002, 7 (2), 255~266.
 - 9 Guo Yufu, Yu Yongqiang, Liu Xiyang, and Zhang Xuehong, Simulation of climate change induced by CO₂ increasing for East Asia with IAP/LASG GOALS model, *Adv. Atmos. Sci.*, 2001, **18**, 53~66.
 - 10 Cullen, N. J. P., The unified forecast/climate model, *Meteor. Mag.*, 1993, **122**, 81~94.
 - 11 Johns, T. C., R. E. Carnell, J. F. Grossley, J. M. Gregory, J. F. B. Mitchell, C. A. Senior, S. F. B. Tett, and R. A. Wood, The second Hadley Center coupled ocean-atmosphere GCM: model description, spinup and validation, *Climate Dyn.*, 1997, **13**, 103~134.
 - 12 Murphy, J. M., Transient response of the Hadley Centre coupled ocean-atmosphere model to increasing carbon dioxide. Part I: Control climate and flux adjustment, *J. Climate*, 1995, **8**, 36~56.
 - 13 New, M. G., M. Hulme, and P. D. Jones, Representing 20th century space-time climate variability. II: Development of 1901-1996 monthly terrestrial climate fields, *J. Climate*, 2000, **13**, 2217~2238.

Changes of Surface Air Temperature and Precipitation in China during the 21st Century Simulated by HadCM2 under Different Greenhouse Gas Emission Scenarios

Xu Yinlong¹⁾, Xue Feng²⁾, and Lin Yihua²⁾

1) (Agrometeorology Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing, 100081)

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

Abstract Based on the results simulated by HadCM2 under two greenhouse gases emission scenarios, in which equivalent CO₂ increases respectively by 1% and 0.5% per year in concentration since 1990 onward, changes of surface air temperature and precipitation in China during the 21st century are compared. It is shown that the surface air temperature in China rises gradually due to continuous increase of equivalent CO₂ in concentration. By the end of the 21st century, the surface air temperature increases by ~5 °C and ~3 °C under the two scenarios respectively. The temperature increment of time series further shows that the surface air temperature tends to rise obviously even if equivalent CO₂ increases by 0.5% per year in concentration since 1990. The temperature increment under 0.5% scenario cannot be diminished obviously relative to 1% scenario until the middle 21st century. Through with larger interannual variability, the precipitation also tends to increase with greenhouse gases emission increasing. In addition, the effect of greenhouse gas reduction on precipitation is similar to that on surface air temperature. Furthermore, both temperature increment and percentage of precipitation increment depict a clear annual cycle, the surface air temperature increments during autumn and winter are larger than those during

spring and summer, however, the percentage of precipitation increments is larger during winter and spring than during summer and autumn.

Key words: greenhouse gas; emission scenarios; surface air temperature; precipitation