

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

P46 A

石广玉 王喜红 张立盛 黄兴友

(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, 北京 100029)

赵宗慈 高学杰 徐影

(中国气象局国家气候中心, 北京 100081)

摘要 系统总结和介绍了20世纪90年代以来作者所开展的有关人类活动对东亚和中国气候影响的一系列研究活动, 其中包括温室气体辐射强迫及其气候效应, 大气微量气体的全球增温潜能, 对流层和平流层气溶胶的辐射气候效应, 气候系统外部因子对中国气候影响的总体评估, 人类活动对中国和东亚地区未来气候变化的影响, 以及20世纪和21世纪东亚及中国的气候变化。同时给出了一系列研究成果, 这些研究成果对于正确认识和准确预测东亚地区以及中国气候变化具有十分重要的意义。

关键词: 人类活动; 东亚地区; 气候影响

1 引言

气候系统是一个包含大气、海洋、冰雪圈、陆地表面和生物圈的复杂系统。地球气候系统的变化, 实际上是能量平衡改变的结果, 而大气运动的最根本能量来自于太阳辐射, 地气系统本身又向外发射红外辐射, 长期平均而言, 入射和出射辐射达到某种平衡。但是有一些因子的变化能改变这种平衡而造成气候变化, 这些因子统称为气候强迫因子。为了表征地气系统诸因子如入射太阳辐射、大气成分及行星表面特性等的改变对全球能量平衡所施加的影响, 引入了“辐射强迫”的概念。其精确的定义为, 在保持地面和对流层温度不变的前提下, 使平流层温度调整到辐射平衡后, 对流层顶的净辐射通量的变化。通过对不同成分间辐射强迫的比较, 就可以科学地评估气候系统外部各影响因子的相对重要性。

工业革命以来, 由于人类活动的加剧使得大气中温室气体如 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 及 CFCs 的浓度显著增加, 造成全球气候增暖。与此同时, 在人类活动的影响下, 许多地区人为的硫排放也在快速地增长, 结果导致大气中气溶胶浓度大幅度增加, 目前全球大气中气溶胶浓度已明显高于工业革命前的水平^[1]。高浓度的气溶胶, 一方面直接散射和吸收太阳辐射, 从而改变地气系统的能量平衡, 直接影响气候; 另一方面以云凝结核 (CCN) 的形式改变云的光学特性和生命期, 从而间接影响气候。越来越多的研究表明, 随着社会经济的飞速发展, 人类活动对地球气候系统的影响越来越大。当前, 有关

温室气体和气溶胶的辐射强迫特征研究, 已经成为气候变化研究的热点科学问题之一。

2 气候变化的辐射强迫研究

20 世纪 90 年代以来, 我们先后开展了有关温室气体的辐射强迫和增温潜能以及气溶胶辐射强迫特征的研究, 取得了一系列有意义的成果。

2.1 大气微量气体的辐射强迫及其温室气候效应研究

近年来, 我们发展和完善了一个辐射-对流模式^[2,3]。利用上述模式分别精确地计算了大气温室气体的瞬时辐射强迫和平流层温度调整后的辐射强迫, 给出了简化的计算公式。模拟表明, 在相当宽的浓度范围内其精度优于 0.05 W m^{-2} , 这就为比较各种温室气体的相对重要性提供了一种相当精确的简便算法, 其中有关 CO_2 辐射强迫的计算公式被 IPCC TAR (2001) 列为标准公式之一。除此之外, 我们还就温室气体辐射强迫及其气候效应的其他科学问题展开深入研究, 结果表明: 1) 大气温室气体的辐射强迫与温室效应受到不同气体吸收带重叠的重大影响; 2) 大气 CO_2 以外的其他微量气体 (例如 CH_4 , N_2O 和 CFCs 等) 浓度的增加对未来的气候变暖可能起重要作用; 3) 据目前认为对大气臭氧层有破坏作用的 CFCs 类物质 (如 CFC11, CFC12, CFC113, CFC114, CFC115) 的代用品 (如 HCFC124, HCFC125 等), 其臭氧消耗潜能 (ODP) 虽小, 但依然具有较强的温室效应; 4) 地气系统的各种反馈过程对地面温度的变化具有重大影响。

2.2 大气微量气体全球增温潜能的模拟估算

当前对温室效应的评估主要有三种指标: 地表温度变化、辐射强迫和全球增温潜能 (Global Warming Potential, GWP)。地表温度变化和辐射强迫这两种度量标准, 都是建立在大气中温室气体浓度变化的基础上, 而不直接涉及某种气体的排放量。但是, 从制定方针、政策的观点来看, 估价某种温室气体的进一步排放所产生的潜在影响显得更为重要。受到大气臭氧损耗潜能的启发, 一些科学家提出了 GWP 的概念。其定义为: 瞬态释放 1 kg 的某种温室气体, 其辐射强迫的时间积分量与瞬态释放 1 kg 二氧化碳所产生的相应量之比值。用全球增温潜能度量温室气体对气候变暖的影响是目前最合理, 最科学的评价方法。与地表平均温度的变化相比, 它更加准确可靠; 与辐射强迫相比, 它包含了温室气体对气候影响的时间积分效应, 暗示了温室气体的寿命长短对气候变化的作用和气候变化的长期性。

为了更好地反映温室气体的增温潜能, 我们首先改进和发展了一个一维大气化学模式。模式共包括了 31 种温室气体、186 个化学动力方程和 93 个光解反应。经过和 LLNL-2D 化学模式以及 UIUC-2D 化学模式的对比, 表明该模式对常用的 30 多种温室气体具有很好的模拟能力。由此模式, 计算了温室气体的廓线和大气寿命。根据这些廓线资料, 结合最新的温室气体吸收截面资料, 通过辐射对流模式精确计算了温室气体的辐射强迫。最后计算出这 31 种温室气体在未来 20 年、100 年和 500 年时间跨度的 GWP^[4] (如表 1 所示)。上述计算结果将为政府部门制定有关政策提供坚实的基础。

2.3 对流层和平流层气溶胶的辐射强迫及其气候响应的模拟估算

对流层气溶胶是人类活动影响气候的主要因子之一, 而平流层气溶胶则主要来自于

表 1 部分温室气体的 GWP (辐射强迫单位: 10^9 W m^{-2})

气体	辐射强迫	寿命 (年)	20 年	100 年	500 年
CH ₄	4.80E-3	12.2	83	31	10
N ₂ O	3.86E-2	120	344	375	198
CFC-10	0.120	35	2520	1680	540
CFC-11	0.262	45	6520	4784	1664
CFC-12	0.293	100	9244	9060	4712
CFC-13	0.209	640	8400	11760	13692
CFC-14	0.128	50000	5850	8550	13350
CFC-113	0.296	85	6100	6000	2700
CFC-114	0.318	300	7742	10116	8980
CFC-115	0.190	1700	5200	7600	10500
HFC-21	0.083	2.0	342	98	32
HFC-22	0.208	12.3	4963	1814	563
HFC-32	0.096	5.4	2000	609	191
HCFC-123	0.191	1.4	370	114	34
HCFC-124	0.208	6.2	1910	590	180
HCFC-125	0.214	31.0	5425	3150	1050
HFC-134	0.204	10.0	3560	1220	370
HFC-134a	0.176	14.0	3920	1600	480
HFC-143a	0.156	53.5	6740	5370	1940
HFC-152a	0.118	1.5	540	160	50
HCFC-141b	0.151	9.3	2250	750	236
HCFC-142b	0.202	18.8	5200	2400	740
HCFC-225ca	0.221	2.0	480	150	45
HCFC-225cb	0.329	6.3	2062	639	196
HFE-125	0.386	15.3	6825	2750	860
HFE-134	0.407	26.2	6200	2200	680
HFE-374pc2	0.295	0.43	190	56	17
HFE-347mcf2	0.460	2.8	1370	410	130
C ₂ F ₆	0.258	10000	8000	11900	18000
SF ₆	0.517	3200	15100	22200	32400
HFC-245fa	0.27	7.6	2850	905	280

火山爆发等自然原因。

(1) 二维模式的研究^[5,6]。首先, 我们用一个先进的辐射计算模式 (k -分布模式) 估算了对流层和平流层气溶胶的辐射强迫。在此基础上, 用一个两维能量平衡模式估算了全球及中国地区的温度响应, 主要结论为: 1) 存在相同光学厚度的平流层火山气溶胶的情况下, 地表反射率越大, 辐射强迫越小, 反之亦然。2) 皮纳图博 (Pinatubo) 火山在喷发后的前 3 个月, 辐射强迫在喷发纬度高达 -7.4 W m^{-2} ; 随着时间的推移, 这一强迫向各纬度带扩展且幅度迅速下降, 到第三年辐射强迫仅为 -0.5 W m^{-2} 。3) 地面温度对火山爆发的响应存在某种滞后。皮纳图博火山在喷发后的前 3 个月, 地面降温幅度比较小, 降温主要发生在响应比较快的中高纬度大陆上; 至喷发后的一年半左右降温最大, 最大的降温区位于欧亚大陆和北美地区; 此后, 降温幅度开始减小, 降温的纬向差异和海陆差异较小。4) 中国地区硫酸盐气溶胶所产生的辐射强迫地区性差异比较

大, 最大值在长江中下游地区, 达 -3 W m^{-2} 。另外, 全球硫排放对中国地区地面温度影响较大。5) 尽管硫酸盐气溶胶的产生与温室气体呈相反的气候效应, 但这种抵偿作用是局部的。

(2) 三维全球模式的研究^[7]。在搜集整理了从太阳短波到红外谱段 ($0.3 \sim 40 \mu\text{m}$) 硫酸盐和黑碳气溶胶粒子的复折射指数的基础上, 在气溶胶粒子谱 ($0.005 \sim 20 \mu\text{m}$) 为对数正态分布假定及 8 种不同相对湿度条件下, 用精确的 Mie 算法计算了上述所有波段间隔中这些气溶胶粒子的质量消光效率, 单次散射反照率以及不对称因子, 精确地体现了这些特性随波长变化的细微特征; 初步建成了一个全球人为硫酸盐和黑碳气溶胶资料库。

利用两个化学输送模式 (CTM) C97 和 F97 的资料, 用 LASG AGCM 模拟了硫酸盐、烟尘及其外部混合后所导致的辐射强迫。结果表明, 该模式模拟的辐射强迫是合理的, 抓住了这些气溶胶辐射强迫的主要特征。在 C97 资料中, 全球最大的强迫中心位于西欧 (-5 W m^{-2}) (图 1), 而 F97 资料的强迫最大值则出现在东亚地区 (-5

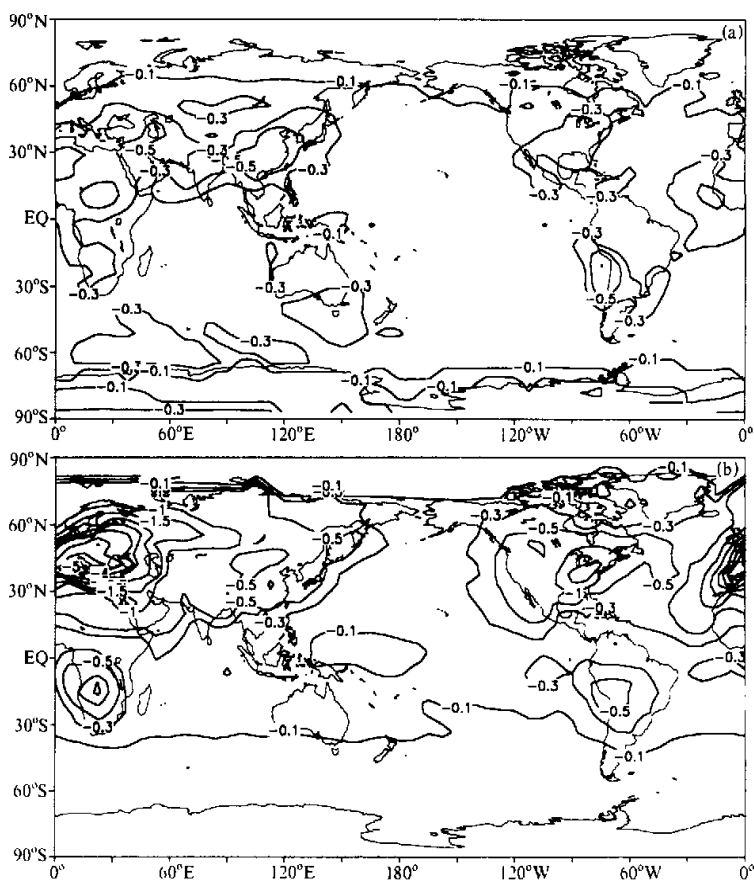


图 1 总硫酸盐季节平均的辐射强迫 (W m^{-2})

(a) 冬季; (b) 夏季

W m^{-2})。在某些地区, 硫酸盐气溶胶导致的辐射强迫超过了 CO_2 等温室气体引起的强迫, 因此可“补偿”由温室效应引起的变暖。烟尘强迫的最大中心出现在夏季的南美和非洲中南部, 为 4.0 W m^{-2} 。

(3) 三维区域模式的研究^[8]。首先, 我们完善和发展了东亚地区硫化物长距离输送模式。利用改进后的硫输送模式详细地研究了东亚地区人为硫化物的空间分布和季节变化规律, 深入分析了硫化物的源排放、输送通量、干湿沉降以及柱含量的时空演变特征, 探讨了硫化物在大气中的寿命, 最后定量评估了东亚地区对流层人为硫化物的区域收支平衡。结果表明, 中国大陆, 尤其是中国东部经济发达地区, 已经成为东亚地区乃至全球硫污染的主要贡献源之一。大量的硫酸盐气溶胶主要集中在 4 km 以下的对流层大气中。输送过程对污染物区域收支平衡影响很大。夏季污染物由西南向东北方向输送, 冬季长江中下游形成物质辐合带。大气中硫酸盐气溶胶的主要清除过程为湿沉降过程, 东亚地区年平均柱含量为 0.033 Tg(S) , 寿命为 3.2 天。

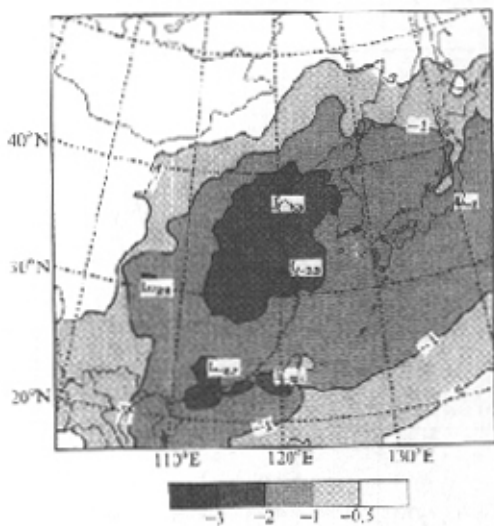


图3 人为硫酸盐直接辐射强迫的年平均分布
(单位: W m^{-2})

游、山东半岛以及黄海和渤海海域, 为 $-2.0 \sim -3.4 \text{ W m}^{-2}$ 之间。同时, 四川盆地、珠江三角洲及我国的台湾地区也形成范围较小的强迫高值区, 超过 -2.0 W m^{-2} (图3)。

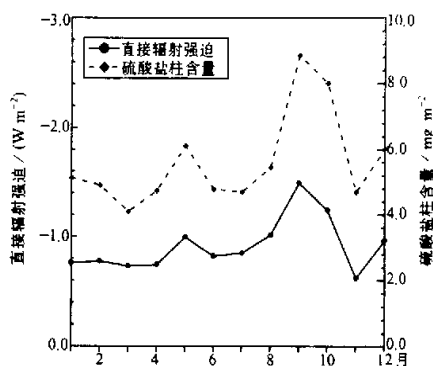


图2 区域平均人为硫酸盐柱含量及瞬时直接辐射强迫的季节变化

其次, 我们利用三维区域气候模式 (RegCM2), 详细分析了东亚地区对流层人为硫酸盐直接辐射强迫的时空分布特征, 同时深入探讨了地表反照率以及云量对直接辐射强迫的影响, 定量估算了云区气溶胶对直接辐射强迫的贡献, 最后讨论了人为硫酸盐对地表和大气短波辐射平衡产生的不同影响。结果表明: 人为硫酸盐直接辐射强迫具有明显的季节变化和地理分布特征; 辐射强迫的这种变化特征, 不仅强烈地依赖于硫酸盐柱含量的季节变化和地理分布, 而且取决于云量季节变化和地理分布。区域平均直接辐射强迫的逐月变化呈双峰结构, 其中 9 月最大, 为 -1.5 W m^{-2} , 5 月次之, 为 -1 W m^{-2} (图 2)。年平均强迫的高值区主要位于长江中下

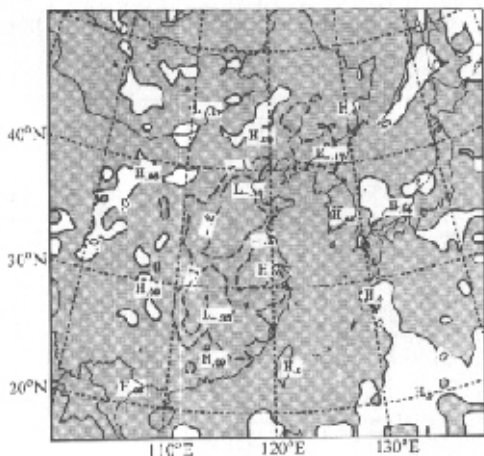


图4 人为硫酸盐引起的年平均地面温度变化
(单位: $^{\circ}\text{C}$)

第三, 在完全考虑气候系统反馈的情形下, 较详细地分析了由于硫酸盐辐射强迫而引起的地面气温和降水的响应。研究表明: 地面温度响应呈现出明显的区域季节变化特征。就年平均而言, 由于硫酸盐辐射强迫的影响, 模拟区域内大部分地区普遍降温。降温比较明显的区域位于 (110°E 以东, 40°N 以南) 的中国大陆地区, 超过 -0.1°C 。其中华北平原和长江中游的湖南、湖北形成两个降温大值中心, 幅度超过 -0.2°C (图4)。冬春季节, 温度响应与辐射强迫之间满足较好的对应关系; 而夏秋季节, 尤其是夏季, 辐射强迫与温度响应之间呈现出更复杂的非线性关系。

3 气候系统部分物理因子对中国气候影响的总体评估

气候变化的辐射强迫研究结果, 实际上已经揭示了气候系统一些物理因子对中国气候的影响。为了更清楚地显示它们的相对作用, 我们把一个辐射对流模式输出的辐射强迫, 输入到一个全球大气海洋耦合的模式中, 并利用可用的观测资料, 重建了近百年全球平均地面气温的变化^[9] (图5)。结果发现: 1) 大气温室气体浓度的增加支配了过去一个多世纪以来的全球变暖; 2) 平流层火山气溶胶的变化是造成年际和10年际平均温度变化的主要原因, 由图可以看出, 在模式中考考虑火山气溶胶以后, 模拟的和观测到的气温距平之间, 总的拟合程度获得了明显的改善; 3) 无论对全球的气温变化趋势, 还是对其10年间和10年际的变化, 太阳活动不大可能具有重要的贡献。

利用 GCM 模式评估气候系统各物理因子对气候影响的研究正在进行当中。尽管

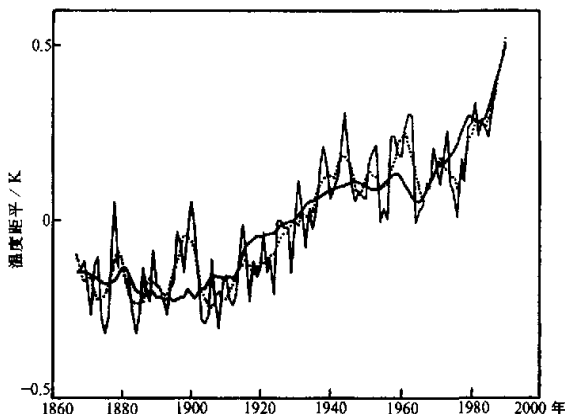


图5 模拟与观测的温度距平比较
虚线为模拟值, 细实线为观测值, 粗实线为观测值的5年滑动平均

自工业革命以来由 CO₂ 等温室气体造成的全球变暖，现在已经得到广泛的认可，但是这些温室气体究竟会造成多大程度的变暖，不同气候模式的结果之间还存在着相当的差别。我们所做的温室气体浓度增加的敏感性试验，一方面旨在研究这种外部强迫因子对气候的作用，另一方面，也是对模式的进一步检验。

所用的模式是 IAP / LASG 发展的海气耦合模式 GOALS，并且在模式中考虑了多

表 2 20 世纪 90 年代以来人类活动对东亚和中国气候变化影响研究

作者	模式名	模式简单特征	人类活动数值 实验设计	人类活动对东亚 和中国气候变化的影响 (达到 CO ₂ 加倍)	
				气温增加(°C)	降水增加(%)
赵宗慈 ^[15]	GFDL, GISS, MPI, OSU, UKMO	5 个全球模式, L2~ L12, 60 m	1 × CO ₂ , 2 × CO ₂	2.5	5
王会军等 ^[16]	IAP AGCM / MLO	全球模式 L2, 4 × 5, 60 m	1 × CO ₂ , 2 × CO ₂	2.0	+
赵宗慈等 ^[17]	GFDL, GISS, LLNL, MPI, OSU, UKMOL, UKMOH	7 个全球模式, L2~ L16, 60 m	1 × CO ₂ , 2 × CO ₂	3.0	9
赵宗慈 ^[18]	7 个全球模式在东亚 地区与简单全球能量 平衡模式套用	简单全球能量平衡模 式(一维箱式海洋 47 层)	GHG, SO ₂ , O ₃	2.0	6
陈克明等 ^[19]	IAP AGCM	全球大气海洋模式, L2, 4 × 5, L20	CO ₂ 1% / a	3.6	10
陈隆勋等 ^[20] 宋玉宽等 ^[21]	NCAR / CAMS CCM1	全球大气模式 L12, R15	1 × CO ₂ , 2 × CO ₂	5.5	18
李维亮等 ^[22]	NCAR / CAMS RegCM1	L14, 100 km, 中国区 域气候模式嵌套全球 气候模式	1 × CO ₂ , 2 × CO ₂	3.4	20
王彰贵等 ^[23, 24]	NOA / OSU- GFDL, AOGCM	全球大气海洋模式, L2, 4 × 5, L5, 2 × 5	1 × CO ₂ , 2 × CO ₂	0.7	+
陈明等 ^[26]	NCAR / EAC RegCM2	L10, 60 km, 中国区 域气候模式嵌套全球 气候模式	CO ₂ 1%	5.2	+
赵宗慈等 ^[26]	CSIRO, GCM5, GCM7, GFDL1, GFDL2, GISS, JMA, LLNL, LSG, MPI, NCAR, OPYC, OSU, UKMO1, UKMOL, UKMOH	全球大气海洋模式, L2~L18, L5~L20	CO ₂ 1%	2.2	10
郭裕福等 ^[17]	GOALS / LASG AOGCM	全球大气海洋模式, L9 R15, L20	CO ₂ 1%	2.1	5
高学杰等 ^[28]	NCC / NCAR RegCM2.3	中国区气候模式嵌 套全球大气海洋模式 L16, 60 km	GHG 1%, SO ₂	2.5	13
平均				2.8	11

注：+表示增加

种温室气体的作用, 包括 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 、 CFC11 和 CFC12 , 其浓度取历史实测值。敏感性试验的初步结果表明, 温室气体的辐射强迫在 1980 年时达到 1.7 W m^{-2} , 全球的整体分布形式沿纬圈呈带状, 在中纬度地区辐射强迫最大, 而在极地最小, 全球平均温度从 1900 年至 1980 年上升了约 0.5°C 左右, 在 1970 年代以前, 这种升温比较缓慢, 幅度较小, 此后温度升高明显加快。

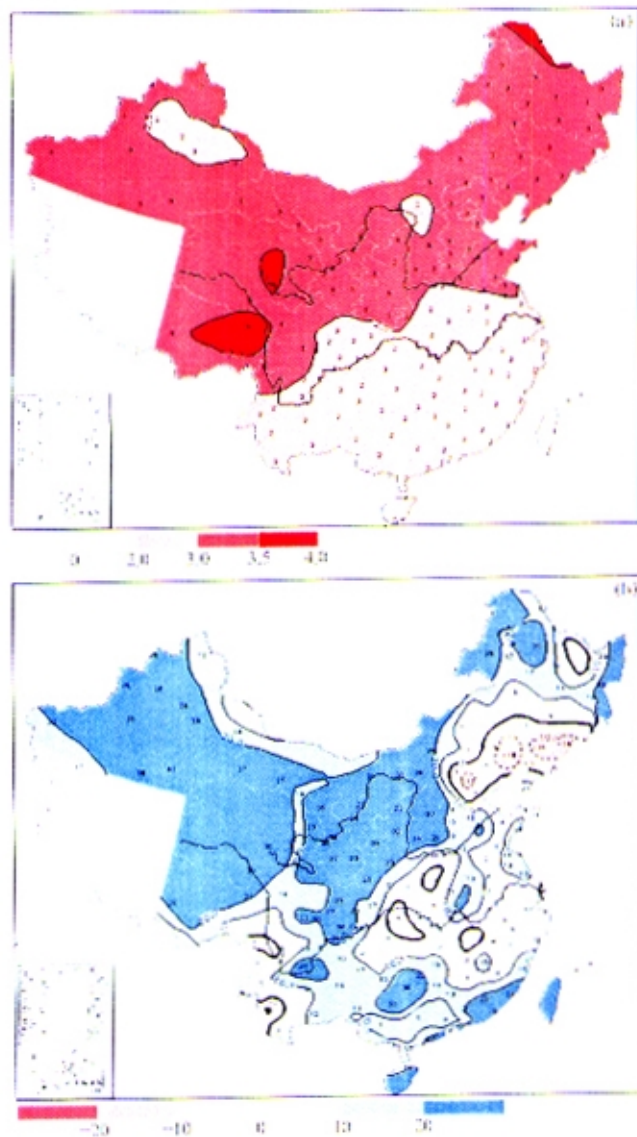


图6 中国区气候模式模拟由于人类活动达到温室气体加倍时
中国气温(a, $^{\circ}\text{C}$)和降水(b, %)的变化^[24]

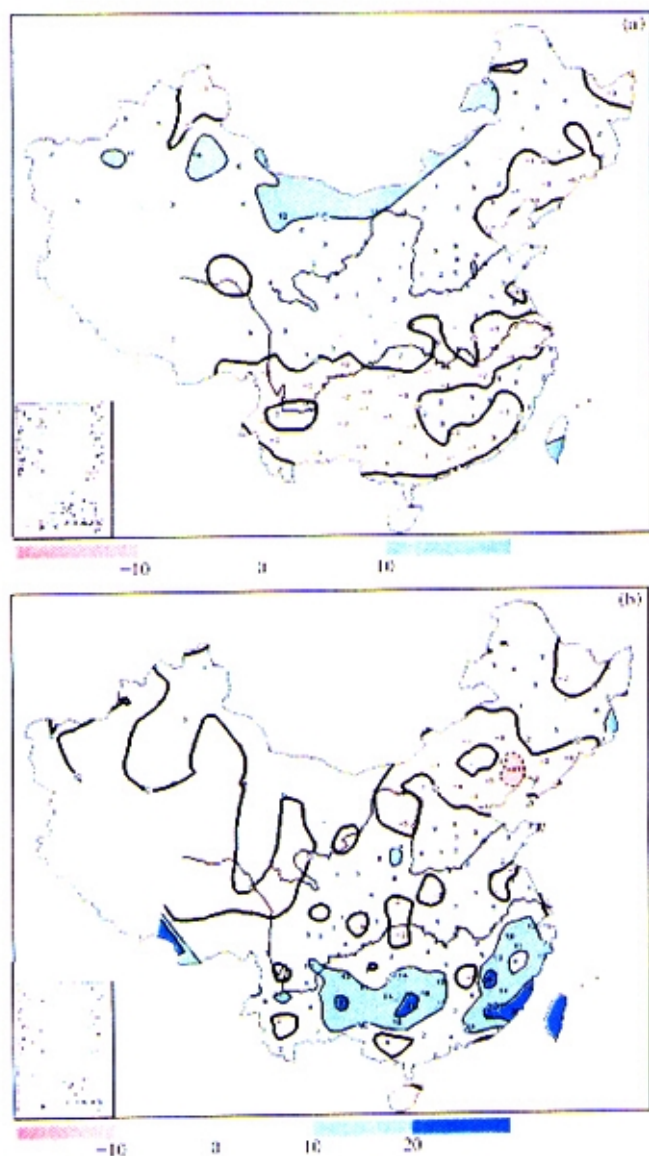


图7 中国区域气候模式模拟由于人类活动达到温室气体加倍时中国降水日数的变化(a, %)和强降水日数(b, 降水强度超过35 mm的日数)的变化^[30]

4 人类活动对中国和东亚地区未来气候变化的影响

自20世纪90年代以来,越来越多的中国科学家利用气候模式研究人类活动对东亚

和中国气候变化的影响^[10~29]。表 2 总结了近 10 余年中国科学家的研究工作。从表 2 注意到, 大约 10 余个中国科学家研究小组利用近 40 个模式(其中近 10 个中国的模式)的计算结果表明, 由于人类活动, 大气中的温室气体浓度增加, 在达到大约加倍时, 东亚和中国的年平均气温大约增加 0.7~5.5℃, 平均为 2.8℃; 降水将可能增加 5~20%, 平均为 11% 左右。

作为一个例子, 图 6 给出利用中国区域气候模式与全球大气海洋环流模式嵌套, 计算达到温室气体加倍时, 相对于目前气候(1961~1990 年平均), 年平均气温和降水的变化。从图 6 注意到, 中国北部将增温 2.0~2.5℃, 南部增温较小, 约为 1.5~2.0℃^[28]。降水则是中国西北与东北可能明显增加。图 7 给出年降水日数和强降水日数的变化, 注意到由于温室效应, 南方强降水日数将可能明显增加^[28]。

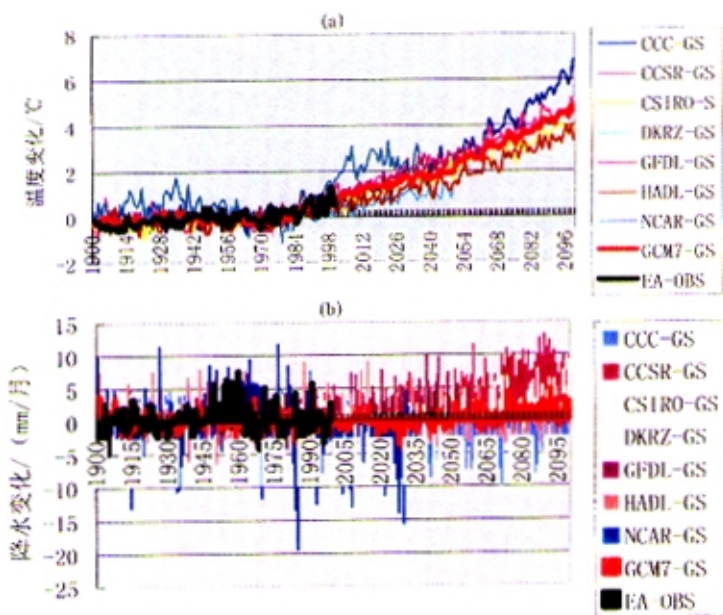


图 8 7 个全球气候模式模拟由于人类活动(温室气体和硫化物气溶胶 GS) 20 世纪和 21 世纪东亚地区气温(a)和降水(b)的变化, 图中粗黑实线为观测值(OBS)、粗红实线为 7 个模式集成值(GCM7), 其他细线为每个模式的模拟值¹⁾

5 20 世纪和 21 世纪东亚和中国的气候变化

近些年来, 世界各国开始重视用全球气候模式检测 20 世纪的气候变暖 and 展望 21 世纪的气候变化。中国科学家也正在利用中国的模式进行模拟研究, 如中国科学院大气物

1) Zhao Zongci and Xu Ying, Detection and scenarios of temperature change in East Asia, *World Resource Review*, 2002, in press.

理研究所和中国气象局国家气候中心, 但是这些研究正在计算之中。有些研究工作利用 IPCC 第一工作组的 7 个全球气候模式计算了 20 世纪和 21 世纪东亚地区的气候变化¹⁾。图 8 给出考虑由于人类活动温室气体和硫化物气溶胶排放增加, 7 个模式 (CCC, CCSR, CSIRO, DKRZ, GFDL, HADL, NCAR) 计算的 20 世纪和 21 世纪东亚地区年平均气温和降水的变化。为作检测, 图 8 中还给出观测的 20 世纪东亚地区的气温与降水的变化。计算表明, 由于人类活动, 到 21 世纪末, 东亚气温将可能增加 2.5~6.8℃。降水的变化较为复杂, 多数模式的计算结果表明降水可能增加, 但是有些模式的计算表明将可能减少。对于 20 世纪的检测表明, 人类活动对东亚地区的近 50 年变暖起了较为明显的作用。此外检测还表明, 7 个模式具有较好的模拟 20 世纪东亚气温变化的能力, 但是模拟 20 世纪东亚降水的变化较差。检测还注意到, 7 个模式的集成模拟 20 世纪东亚气温的变化优于单个模式的模拟效果。

致谢: 感谢 7 个模式组和 IPCC 第一工作组模式资料中心提供模式计算结果, 以及 P. Jones, M. Hulme 和王绍武、龚道溢、国家气候中心提供观测资料。

参 考 文 献

- 1 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.
- 2 石广玉, 大气微量气体的辐射强迫与温室气候效应, 中国科学 (B 辑), 1991, No. 7, 776~784.
- 3 于秀兰、石广玉, 平流层温度调整的辐射强迫的简化计算, 高原气象, 2001, 20 (3), 271~274.
- 4 黄兴友, 温室气体全球增温潜能的研究, 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 2001.
- 5 胡荣明、石广玉, 平流层气溶胶的辐射强迫及其气候响应的水平二维分析, 大气科学, 1998, 22(1), 18~24.
- 6 胡荣明、石广玉, 中国地区气溶胶的辐射强迫及其气候响应试验, 大气科学, 1998, 22(6), 919~925.
- 7 张立盛, 硫酸盐和烟尘气溶胶辐射强迫的模拟和估算, 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 1999.
- 8 王喜红, 东亚地区人为硫酸盐气溶胶气候效应的数值研究, 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 2000.
- 9 石广玉、郭建东、樊小标、王令霞, 近百年全球平均气温变化的物理模式研究, 科学通报, 1996, 41(18), 1681~1684.
- 10 Zeng Qingcun, Some numerical ocean-atmosphere coupling models, Presented at the First International Symposium Integrated global ocean monitoring, Tallinn, USSR, Oct. 2~10, 1983.
- 11 Zeng Qingcun, Numerical simulation of climate and environment, *Climate, Environment and Geophysical Fluid Dynamics*, Edited by Ye Duzheng, Zeng Qingcun, Wu Guoxiong and Zhang Zuojun, China Meteorological Press, 1993, 3~11.
- 12 Li Xiaodong, Zhao Zongci, Wang Shaowu and Ding Yihui, Evaluation of CGCM and simulation of regional climate change in East Asia, *Acta Meteorologica Sinica*, 1995, 9, 385~401.
- 13 陈起英、俞永强、郭裕福, 二氧化碳加倍引起的中国的区域气候变化, 气候变化规律及其数值模拟研究论文 (第二集), 85-913-02 课题编委会编辑, 北京: 气象出版社, 1996, 156~170.
- 14 俞永强、陈克明、金向洋、郭裕福、张学洪, 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), 85-913-02 课题编委会编辑, 北京: 气象出版社, 1996, 123~137.
- 15 赵宗慈, 模拟温室效应造成的中国气候变化, 气象, 1989, 15, 10~14.
- 16 王会军、曾庆存、张学洪, 由于二氧化碳倍增气候变化的数值试验, 中国科学 (B 辑), 1992, 6, 663~672.
- 17 Zhao Zongci and M. Hulme, Recent and future climate changes in East Asia and China, Annual report 1992-1993 of CAMS, China Meteorological Press, 1993, 25~32.
- 18 Zhao Zongci, Climate change in China, *World Resource Review*, 1994, 6, 125~130.

1) Zhao Zongci and Xu Ying, Detection and scenarios of temperature change in East Asia, *World Resource Review*, 2002, in press.

- 19 陈克明, 张学洪, 金向洋, 林武银, 俞永强, 郭裕福, 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), 85-913-02 课题编委会编辑, 北京: 气象出版社, 1996, 61~84.
- 20 陈隆勋, 宋玉宽, 王子辉, CCM1气候模式的气候模拟结果分析及与其他气候模式结果的比较, 气候变化规律及其数值模拟研究论文(第二集), 85-913-02 课题编委会编辑, 北京: 气象出版社, 1996, 241~254.
- 21 宋玉宽, 陈隆勋, 二氧化碳稳态倍增下的气候变化数值试验, 气候变化规律及其数值模拟研究论文(第二集), 85-913-02 课题编委会编辑, 北京: 气象出版社, 1996, 228~240.
- 22 李维亮, 龚威, 中国区气候模式对中国地区的区域性气候变化情景的模拟, 气候变化规律及其数值模拟研究论文(第二集), 85-913-02 课题编委会编辑, 北京: 气象出版社, 1996, 255~272.
- 23 王彩贵, 巢纪平, 陈英仪, 蔡怡, 全球海气耦合模式对大气CO₂含量变化的响应, 第一部分: 无海气CO₂循环, 气候变化规律及其数值模拟研究论文(第二集), 85-913-02 课题编委会编辑, 北京: 气象出版社, 1996, 289~299.
- 24 王彩贵, 巢纪平, 陈英仪, 蔡怡, 邢如楠, 全球海气耦合模式对大气CO₂含量变化的响应, 第一部分: 海气CO₂循环, 气候变化规律及其数值模拟研究论文(第二集), 85-913-02 课题编委会编辑, 北京: 气象出版社, 1996, 300~307.
- 25 陈明, 符漳斌, 用一个区域气候模式模拟二氧化碳加倍的区域气候变化, 中国科学院大气物理所博士后论文, 1997.
- 26 Zhao Zongci and Li Xiaodong, Impacts of global warming on climate change over East Asia as simulated by 15 GCMs, *World Resource Review*, 1997, 10, 17~21.
- 27 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, *Advances in Atmospheric Sciences*, 2001, 18, 53~66.
- 28 Gao Xuejie, Zhao Zongci, Ding Yihui, Huang Ronghui and Filippo Giorgi, Climate change due to greenhouse effects in China as simulated by a regional climate model, *Advances in Atmospheric Sciences*, 2001, 18, 1224~1230.

Impact of Human Activities on Climate

II. Impact on Climate Variability over East Asia and China

Shi Guangyu, Wang Xihong, Zhang Lisheng and Huang Xingyou

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

Zhao Zongci, Gao Xuejie and Xu Ying

(National Climate Center, Chinese Administration of Meteorology, Beijing 100081)

Abstract Researches on Impacts of human activities on climate variability over East Asia and Chinasince the 1990s are summarized and introduced in this paper. Those researches include: radiative forcing and climate effect of greenhouse gases; global warming potential of greenhouse gases; radiative forcing and climate effect of tropospheric and stratospheric aerosols; impact of human activities on future climate variability over East Asia and China and the climate variability in East Asia and China during the period of the 20th century and the 21st century. A series of research results are shown in the paper. Those results will be very important for us to understand and forecast the future climate variability in East Asia and China accurately.

Key words: human activity; East Asia; climate effect