

模拟人类活动影响气候变化的新进展

赵宗慈

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

提 要

文章给出近几年国内外研究人类活动影响全球气候变化的数值模拟的新进展。

关键词: 人类活动; 气候模拟; 气候变化。

1 引 言

自1990年发表了政府间气候变化委员会(IPCC)三个工作组的报告^[1-3]以来, 研究人类活动对气候变化影响的模拟工作有了令人瞩目的发展, 下面给出国内外有关研究的最新动态。

2 国外的进展

国外近五年来侧重研究用高分辨率全球多层大气海洋海冰模式计算100年温室气体增加对气候变化的影响; 研究、评估多种气候模式的特点及改进; 研究模式的模拟误差问题等。

(1) 温室气体增加影响气候变化的模拟

表1给出美国宇航局(GISS, Hansen等, 1988)^[4], 美国威斯康星大学(UW, Houghton等, 1991)^[5]、普林斯顿大学流体动力学实验室(GFDL, Manabe等, 1990, 1991)^[6-7], 美国国家大气研究中心(NCAR, Washington和Meehl, 1990, 1991)^[8,9], 英国气象局(UKMO, Bennets报告, 1991)^{*}, 德国马克斯普朗克研究所(MPI, Cubasch等, 1990, Bakan等, 1991)^[10,11], 德国汉堡大学气象研究所(UHH, Oberhuber等, 1990)^[12], 法国国家气象中心(FMC, Planton等, 1991)^[13], 以及美国耶鲁大学改进的CCMI(YALE/CCMI, Oglesby和Saltzman, 1990)^[14]的气候模式特点以及试验设计方案。总结这些研究工作表明: ①目前模式的发展趋势是大气部分的垂直层次已开始选用19—20层, 海洋部

1992年1月10日收到, 8月12日收到修改稿。

* 1991年在中国气象局报告。

表 1 温室气体增加影响气候变化的模拟(瞬变长积分,准平衡长积分)

模式	AGCM (分辨率)	OGCM (分辨率)	预备阶段积分	控制积分 敏感积分	敏感试验 设计
GISS	9 层 8°×10°	混合层(60m)		100 年	温室气体增加 1.5%/年
UW	5 层 11.6°×11.25°	混合层(50m)	11 年加 4 年	100 年	
GFDL	9 层 R15	12 层 4.5°×3.75°	AGCM8 年 OGCM1250 年	100 年 后 60 年	2×CO ₂
GFDL	9 层 R15	12 层 4.5°×3.75°	AGCM12 年 OGCM2400 年	100 年 100 年	温室气体增加 1%/年
NCAR	9 层 R15	4 层 5°×5°		60 年	温室气体增加 1%/年
UKMO	20 层 2.5°×3.75°	17 层 2.5°×3.75°	AGCM7 年 OGCM110 年 CGCM40 年	75 年 75 年	温室气体增加 1%/年
MPI	19 层 T21	11 层 4°×4°		100 年	IPCCA*
	19 层 T21	11 层 4°×4°		100 年	科威特烟尘**
UHH	19 层 T21	9 层			2×CO ₂
FMC	20 层 T42				
YALE/CCMI	12 层 R15	混合层(50m)		100 年	2×CO ₂

注: * 见文献[1],取 IPCC 第一工作组设计的方案 A. ** 科威特烟尘敏感试验积分. 从 1991 年 2 月 11 日积分到 1992 年 1 月 31 日的垂直层次已选用 12—17 层;②模式的水平分辨率已经发展到 2.5°×3.75°或 T42;③为研究温室气体增加的瞬变气候影响,许多模式已经严格使用预备积分阶段,其中大气部分的预备积分大致在 7—15 年,海洋部分预备阶段的积分在 100—2400 年;④控制试验与温室气体增加试验一般积分 100 年左右;⑤温室气体的设计方案除继续试验 2×CO₂ 外,大多采用温室气体每年增加 1%或 1.5%来做计算;⑥试验结果表明,如果大气中温室气体浓度每年增加 1%或 1.5%,则大气中 CO₂ 浓度将增加 1 倍(2×CO₂),即大约 60—70 年后,全球年平均气温将上升 1.3—2.3°C,其变暖的数值低于原来用大气耦合混合层海洋海冰模式的模拟结果,且个别地区出现变冷趋势.表明在人类活动影响气候变化中,深层海洋作用是显著的,不可忽略的.

最近,美国能源部在制定未来发展的气候模式项目中提出^[15],将制作大气与海洋垂直层次分别为 40 层,水平分辨率的纬度与经度格点距大致为 40km×40km(即大约相当于经纬度 0.4°×0.4°)的多层次高分辨率气候模式.

(2) 评估多种气候模式及模拟结果

目前世界各国已有全球大气耦合海洋海冰模式 20 余种^{[1][16—19]},总括这些工作可以得到以下几方面较为一致的见解:①一般来说,模式的垂直层次愈多,逼近大气与海洋的效果愈好.模式水平分辨率的适当提高有助于提高模式的区域模拟效果.②作人类活动的气候模拟研究,所用的气候模式一定要积分计算足够长的时间.对于一个多层大气环流模式,至少要积分 5 至 10 年后,其结果方可用来分析人类活动影响;对于一个多层大气耦合混合层海洋海冰模式,至少要积分 20 年;对于一个多层大气耦合多层海洋与海冰模式,则大气部分至少要积分 8 到 12 年,海洋部分则至少应积分 400 年以上.例如表 1 中 GFDL 的预备积分阶段是足够长的.③云-辐射与冰雪反馈过程在模拟人类活动中起极重要作用.评估 17 个全球大气耦合混合层海洋海冰模式的云-辐射反馈过程表明,在考虑晴空情况下,17 个模式的敏感性参数基本一致.但是若把每个模式设计的云-辐射反馈过程加入

后,则 17 个模式的敏感性参数差异极大.由此可见,云-辐射反馈过程在研究人类活动中的重要性.表 2 给出用 GFDL 与 GISS 的大气耦合混合层海洋海冰模式,分别对比在无云无冰雪反馈过程、有云反馈过程以及有云和有冰雪反馈三种情况下,CO₂ 倍增对全球年平均气温的影响^[1].表 2 表明,当两个模式不包括云与冰雪反馈过程时,由于 CO₂ 倍增,造成全球增暖值较小,仅为 1.7—2.0°C,且两个模式增暖值较接近.当两个模式都考虑各自的云反馈过程,CO₂ 倍增,GFDL 模式增暖 2.0°C,而 GISS 模式增暖 3.2°C,后者的云反馈起了很大作用.当云与冰雪反馈全部加入,CO₂ 倍增,两个模式模拟全球增暖 4.0—4.2°C.这表明各种反馈过程在增暖中的作用随模式的设计不同,差异很大.由此启示我们,各种反馈过程的设计一定要尽量接近实际,否则对 CO₂ 倍增的模拟可以相差很大.而且有必要进一步认识各种反馈过程及它们之间的相互作用、联系以及相对重要性.④陆面过程亦是影响人类活动气候模拟的主要方面.对比 NCAR、GFDL 与 GISS 三个 9 层大气 1 层混合层海洋模式的陆面能量平衡方程中的各项与从观测场计算的项,其中两个数值较大的项(即向下的长波辐射与潜热项),三个模式与观测的差异较大,且在计算 CO₂ 倍增中,此二项都起较大作用^[18].⑤人类活动气候模拟中海洋的重要性.受计算机限制,80 年代的许多模拟人类活动的模式没有包括深层海洋的作用,使模拟结果带有一定的不确定性.90 年代初期 Manabe 等^[6,7]用 GFDL 的两个模式作了类似试验,对比深层海洋在模拟人类活动中的作用.两个模式同样都是 R15 AGCM,一个为耦合混合层海洋海冰模式,作 2×CO₂ 试验(简称 AGCM/MLOM);另一个为耦合多层(12 层)海洋海冰模式(简称 AGCM/OGCM),作 100 年计算,取相当于 2×CO₂ 的时间对应的第 60 年到 80 年平均值.表 3 给出两模式计算结果,由于加了深层海洋,温室气体对全球气温影响明显减小,增暖幅度降低,尤以海洋面积较大的南半球更明显.

(3)模式的模拟误差问题

评估 GCM 模式的可靠性,一般用模式模拟的现代气候的各种变量值与场和观测的气候值与场作对比;用模式模拟的古气候各变量与古气候时期地质考查的变量作对比,以及在敏感试验与预测试验中再与观测场对照,从而表明模式的模拟能力^{[1][20-23]}.

大量研究工作表明^{[1][21]},GCM 在模拟全球平均、年平均、纬向平均及年内变化方面是可靠的,在模拟变量的全球地理分布及强度方面亦是较可靠的,但在模拟区域气候方面较差.表 4 给出诸个模式模拟全球年平均气温与全球年降水率与观测值的差值.表 5 给出了诸个模式模拟全球 5 个区域(北美大湖区,东南亚,撒哈拉,南欧和澳大利亚)冬(12—2 月)、夏(6—8 月)气温与降水率与相应的观测值的误差,最后一行给出 Schutz 和 Oort 两种观测值在这 5 个区域冬、夏的差值,以便与模拟结果对照.表中还给出模式的平均模拟误差.

从表 4 看出,各种模式模拟全球年平均气温与观测值的误差较小,除 OSU 模式外,其余模式的模拟误差绝对值<0.6°C;降水率模拟值与观测值的误差绝对值<0.44mm/d.由此表明,诸模式模拟全球气温与降水率效果较好.

区域模拟有以下几个特点:①模拟的各区域气温误差绝对值为 0.2—8.6°C,大部分模式误差在 1°C 以上,且明显超过观测误差;②大多数模式模拟的冬季气温误差大于夏季的误差;③几个高分辨率模式的模拟误差(气温与降水)平均优于低分辨率模式,冬季和夏

表 2 反馈过程在 CO₂ 倍增中对全球年平均气温的影响^[1](2×CO₂-1×CO₂)

反馈过程	GFDL	GISS
无云无冰雪反馈	1.7°C	2.0°C
有云反馈、无冰雪反馈	2.0°C	3.2°C
有云有冰雪反馈	4.0°C	4.2°C

表 3 地面气温变化(°C)(CO₂ 增加试验-控制试验)

区域	AGCM/OGCM	AGCM/MLOM	两模式结果差值(绝对值)
北半球	2.76	3.89	1.13
南半球	1.86	4.04	2.18
全球	2.31	3.97	1.66

注:在文献[7]基础上计算.

表 4 全球年平均气温与全球年降水率模拟值与观测值的差值

模式,研究者	气温差值(°C)	降水率差值(mm/d)
GFDL, Wetherald 和 Manabe(1987)	+0.6	+0.04
GISS, Hansen 等(1984)	+0.05	
NCAR, Washington 和 Meehl(1984)	+0.2	+0.44
OSU, Schlesinger 和 Zhao(1989)	+1.5	-0.15
UKMO, Wilson 和 Mitchell(1987)	-0.4	+0.18

注:表中模式可在文献[1]的参考文献中查找.

表 5 5 个区域气温模拟值与观测值的差值(Schutz 观测值,在文献[1]基础上计算)

模式,作者	北美大湖区		东南亚		撒哈拉		南欧		澳大利亚		5 个区域差值 绝对值平均	
	12-2	6-8	12-2	6-8	12-2	6-8	12-2	6-8	12-2	6-8	12-2	6-8
CCC, Boer 等	-0.7	-0.9	-4.1	-0.3	-8.6	-0.7	2.0	-1.2	-0.7	-3.1	3.2	1.2
NCAR, Wash- ington 和 Meehl	4.2	7.8	-4.5	1.8	3.1	3.6	2.0	4.5	1.7	2.6	3.1	4.1
GFDL, Wetherald R15 和 Manabe	2.0	3.8	-0.9	1.7	3.8	3.5	1.7	4.8	4.3	1.7	2.5	3.1
GFDL, Wetherald R30 和 Manabe	0.4	1.6	-6.0	-0.1	-3.8	-2.2	-4.1	-1.0	-2.7	-2.6	3.4	1.5
GISS, Hansen 等	6.5	-2.6	-0.3	-0.2	-0.8	0.4	7.2	1.0	-1.1	-0.1	3.2	0.9
OSU, Schlesinger 和 Zhao	2.9	-1.7	-1.1	2.6	8.4	4.6	-1.3	-1.7	3.1	8.0	3.4	3.7
UKMO, Wilson 5°×7.5°和 Mitchell	6.0	-2.6	2.7	0.2	3.9	-1.3	3.4	-1.8	-2.4	1.9	3.7	1.6
UKMO, Mitchell 2.5°×3.75°等	-3.7	-1.9	-1.9	-0.4	-1.0	0.3	-2.3	-3.4	-2.1	0.9	2.2	1.4
8 个模式差值 绝对值平均	3.3	2.8	4.3	0.9	4.2	2.1	3.0	2.4	2.3	2.6	3.1	2.2
Schutz 和 Oort	1.4	1.3	1.2	0.3	0.6	0.6	1.2	1.1	0.3	0.9	0.9	0.8

两种观测值的差值

季都表现出这一特征。④模拟5个区域冬、夏降水率误差绝对值一般为0.1—4.9mm/d,大部分模式误差在0.5mm/d以上;⑤大多数模式模拟夏季降水率误差大于冬季,尤以东南亚地区冬季和夏季降水率误差最大。

模拟值与观测值的误差在多大范围内属于可信的,目前较为一致的见解是:①模拟值与观测值的误差在观测值本身的误差范围内,则模拟值是完全可信的;②模拟值与观测值的误差在观测的2个10年气候平均值的差值范围内,则表明模拟值可信;③模拟值经过处理后往往变得更可信。例如,用OSU的AGCM的10年模拟值输出结果经过MOS或PP处理,其逐日最高、最低气温与1977—1986年和1967—1976年的观测值是极为接近的;④用模式本身的敏感试验与控制试验的相对差值来进行误差分析是有一定可信程度的;⑤只用GCM作长期与气候预测,其预报效果是较差的。总括10个GCM作500hPa月平均高度场等的预报效果(共199个个例)表明,预测30天环流场的相关系数水平在0.3—0.6,而后15天的效果远远低于前15天。

目前研究人类活动对气候变化影响的数值模拟试验,其不确定性主要来自以下几方面:①人类活动效应的不确定性。即人类活动造成的多种温室气体以及硫化物、气溶胶等排放量的发展趋势的不确定性,这取决于各国政府的社会经济以及能源发展策略,也取决于各国公众的需求。这种不确定性简称为“社会发展的不确定性”。②未来纯自然的气候变化的不确定性。即只考虑气候的自然变化(无人影响),目前人类的预测准确率还是较差的。这种不确定性简称“自然变化的不确定性”。③气候模式模拟效果的不确定性。限于对气候系统的认识(如海洋作用,陆面作用以及云-辐射问题等)还极不深入,因而目前气候模式水平较低,尤其在区域气候模拟方面可靠性极低。此外,对各种气体与气溶胶等在气候变化中的作用也认识较少,这种不确定性称作“科学的不确定性”。

3 国外区域气候模拟的发展

目前GCM模式在区域部分对气候及气候变化的模拟效果较差。而一般气候研究中又非常关心某个局地区域气候的变化,因而提高GCM模式对局地区域的模拟效果是一项重要的研究工作^{[1][24—27]}。下面分别叙述几种主要作法。

(1)提高全球模式的垂直与水平分辨率

在一些计算机条件较好的单位努力增加现有全球模式的垂直方向与水平方向的分辨率,期望在高分辨率下能提高对局部地区气候状况的模拟效果。但也有人提出,把全球模式水平格距变小,有可能包含更多的中小尺度信息,以致不能突出大尺度特征。

(2)按区域择优选取全球模式

把各种全球模式在本区域模拟结果与本区域相应变量的观测结果加以对照,取在本区域模拟效果好的模式做本区域的计算与分析。这样的作法有一定可行性,但往往不是一个模式计算的各种变量在各时段在该区域效果均好,这样就给研究工作带来一定困难。

(3)在全球模式中改进局部区域物理过程

原有全球模式的物理过程设计偏重于从全球考虑,特别是为在计算机上实现方便,将各种物理过程均在全球各格点上作统一计算,统一处理,这样往往容易忽略了各地区的特

征.有的研究工作考虑在现有 GCM 基础上,专门对有兴趣的区域作一些特殊处理,以期待在这种区域的模拟有所改进.但这种改进是在不改动水平格距的基础上进行的,有时很难实现.近期亦有的试验改变某区域水平格距,这是值得注意的.

(4)在全球模式中嵌套区域气候模式

在全球模式中嵌套区域模式的思想是从中短期数值试验中得来的,即在全球模式中对我们要研究的区域嵌套一个区域的气候模式^{[24][26-27]}.利用全球模式运行的结果作为边界条件,输送给区域模式,再得到较细致的区域模拟结果.一般全球模式的一个格点对应区域模式 100 个格点.

全球模式(G)嵌套区域模式(R)一般要注意以下几个问题:①两种模式在时间尺度与空间尺度上要匹配,即区域模式的水平网格较全球模式要细,区域模式垂直层次应该多于全球模式的层次.同时,对应的积分时间步长则应成比例减小.②嵌套区域模式只能使全球模式在描述局部区域的效果上更详细,而不能使全球模式在该地区的错误得到纠正.由于嵌套的区域气候模式输入的边界信息依赖于全球模式,因而全球模式在该区域的模拟效果起了决定性作用.③区域模式的物理过程设计应该更突出该区域的特征,这样可以搜集更多该区域信息,模拟结果更接近观测实况.

(5)在全球模式中嵌套陆面生物圈模式

气候模拟试验表明,陆面的热量循环过程、水分循环过程、湿度状况、植被状况、土壤类型等都直接影响对人类活动作用的模拟,因而目前一些全球模式中已嵌套陆面生物圈模式(BATS),嵌套的模式对陆面的模拟结果有所改进.

4 国内对人类活动模拟的进展

我国近几年利用 GCM 进行模拟研究有较大进展,但受计算机及经费等限制,在模拟人类活动影响气候变化方面的工作开展较少.表 6 给出 1991 年在几次会议上的有关报告.为表明计算机状况,表 6 最右端给出一些计算工作所花费的计算机 CPU.从表 6 注意到,虽然几个模式在大气部分仅有 2 层,海洋只有混合层,但已表明我国在模拟人类活动方面迈出了可喜的一步.最近,中国科学院大气物理研究所(IAP)的 2 层大气环流模式耦合混合层海洋模式模拟 2 倍 CO_2 ,全球平均地面气温将上升 1.8°C .这个数值低于其它同类模式的模拟结果,这是值得注意的.

在进行温室效应模拟研究的同时,也注意研究在温室效应中的云辐射效应,陆面以及海洋的作用.金向泽与张学洪(1992)*利用二维海洋温盐环流模式做了大量数值试验.试验在 CO_2 突然加倍的情况下积分 3000 年,计算表明,由于温盐环流的作用,使大西洋与太平洋的热平衡响应有所不同.在最初的 200 年内,太平洋平均海表增温比大西洋快;而以后,在相当长的时间内,大西洋平均海表增温比太平洋快,这是由于两大洋深海加热不同而引起的.有些试验结果与国外用三维 GCM 的结果相呼应.

目前国内已有一些单位开始发展 3 层或用 9 层、12 层大气环流模式进行研究工作,

* 个人交流,1992 年论文答辩材料.

多层海洋模式也投入运行并且开始试验嵌套陆面模式与区域模式. 预计随着我国计算机条件的改善, 模拟人类活动影响气候变化的工作亦会有较大进展.

表6 近年来国内有关人类活动影响气候变化模拟试验

模式 (报告人)	AGCM	OGCM	预备阶段 积分	控制积分 敏感积分	设计方案	CPU
IAP (王会军)	2层 4°×5°	混合层 60m		18年 16年	2×CO ₂	CONVEX900
IAP (符淙斌)	2层 4°×5°	/	25年	6个月 6个月	科威特大火 (地面降温)	
IAP (曾庆存)	2层 4°×5°	/	25年	3个月 3个月	菲律宾火山 (反照率变化)	
AMOGCM (赵宗慈) (王坚)	2层 4°×5°	混合层 60m	53年 (从瞬时实况 开始积分) 70年	6个月 6个月	科威特大火 菲律宾、日本火山 (吸收太阳辐射变化)	VAX II 750

注: 表中内容取自作者参加 1991 年几次会议的报告.

5 结 束 语

总括以上的分析, 随着计算机的发展以及对气候系统的深入认识, 温室气体影响气候变化的模拟试验在近些年有了飞速发展. 在研究过程中, 人们开始注意硫化物、气溶胶在气候变化中的冷却作用. 预计未来的五年, 随着环境问题愈来愈受到各国政府与公众的注意, 有关这方面的工作将会有更大的飞跃.

参 考 文 献

- 1 政府间气候变化专门委员会编. 气候变化. IPCC 科学评估. 气科院情报所中文版, 1991.
- 2 政府间气候变化专门委员会编. 气候变化的可能影响. 气科院情报所中文版, 1991.
- 3 政府间气候变化专门委员会编. 应付全球气候变化的反应战略. 气科院情报所中文版, 1991.
- 4 Hansen J., J. Fang, A. Lacis, D. Rind, S. Lebedeff, R. Ruedy and G. Russell. Global climate changes as forecast by the Goddard Institute for Space Sciences three dimensional model. *J. G. R.*, 1988, **93**: 9341—9364.
- 5 Houghton D. D., R. G. Gallimore, L. M. Keller. Stability and variability in a coupled ocean—atmosphere climate model; results of 100—year simulations. *J. Climate*, 1991, **4**: 557—577.
- 6 Manabe S., K. Bryan, M. J. Spelman. Transient response of a global ocean—atmosphere model to a doubling of atmospheric carbon dioxide. *J. Phys. Oceanog*, 1990, **20**: 722—749.
- 7 Manabe S., R. J. Stouffer, M. J. Spelman, K. Bryan. Transient responses of a coupled ocean—atmosphere model to gradual changes of atmospheric CO₂. Part I: Annual mean response. *J. Climate*, 1991, **4**: 785—818.
- 8 Washington W. M. and G. A. Meehl. Climate sensitivity due to increased CO₂: Experiments with a coupled atmosphere and ocean general circulation model. *Climate Dynamics*, 1989, **4**: 1—38.
- 9 Washington W. M. and G. A. Meehl. Characteristics of coupled atmosphere—ocean CO₂ sensitivity experiments with different ocean formulations. In *Greenhouse-Gas-Induced Climate Change: A Critical Appraisal of Simulations and Observations*. Elsevier, Amsterdam, 1991, pp 79—110.
- 10 Cubasch O., E. Maier Reimer, B. Santer, U. Mikolajewicz, E. Roeckner and M. Boetinger. The response of a global coupled O-AGCM to CO₂ doubling. MPI report, MPI fuer Meteorol., Hamburg, 1990.
- 11 Bakan S., A. Chlond, U. Cubasch, J. Feichter, H. Grof, H. Grassl, K. Hariever, I. Schult, U. Schumann, E. Siemann and W. Welke. Climate response to smoke from the burning oil wells in Kuwait. *Nature*, 1991, **351**: 367—372.
- 12 Oberhuber J., F. Lunkett and R. Sausen. CO₂ doubling experiments with a coupled global isopycnic ocean-atmosphere circulation model. Rep. D. Met. Inst. Univ. Hamburg, Hamburg, 1990.
- 13 Planton S., M. Deque, C. Bellevaux. Validation of an annual cycle simulation with a T42—L20 GCM. *Climate Dy-*

- namics*, 1991, **5**: 189—200.
- 14 Oglesby R. J. and B. Saltzman. Sensitivity of the equilibrium surface temperature of a GCM to systematic changes in atmospheric carbon dioxide. *Geophys. Res. Letters*, 1990, **17**: 1089—1092.
- 15 Building and Advanced Climate Model. Program Plan for the CHAMMP Climate Modeling Program. Ed. by U. S. Dept. of Energy, Dec. 1990.
- 16 Cess R. D. and G. L. Potter. A methodology for understanding and intercomparing atmospheric climate feedback processes in general circulation models. *J. G. R.*, 1988, **93**: 8305—8314.
- 17 Cess R. D., G. L. Potter, J. P. Blanchet, G. J. Boer, S. J. Ghan, J. T. Kiehl, H. L. Treut, Z. X. Li, X. Z. Liang, J. F. B. Mitchell, J. J. Morcrette, D. A. Randall, M. R. Riches, E. Roeckner, U. Schlese, A. Slingo, K. G. Taylor, W. M. Washington, R. T. Wetherald, and I. Yagai. Interpretation of cloud climate feedback as produced by 14 atmospheric general circulation models. *Science*, 1989, **245**: 513—516.
- 18 Gutowski U. J., D. S. Gutzler, W. —C. Wang. Surface energy balances of three GCM: implications for simulating regional climate change. *J. Climate*, 1991, **4**: 121—134.
- 19 Randel W. J. and D. C. Williamson. A comparison of the climate simulated by the NCAR community climate model (CCM1, R15) with ECMWF analyses. *J. Climate*, 1990, **3**: 608—633.
- 20 Karl T. R., W. —C. Wang, M. E. Schlesinger, R. W. Knight and D. Portman. A method of relating general circulation model simulated climate to the observed local climate, Part I: seasonal statistics. *J. Climate*, 1990, **3**: 1053—1079.
- 21 赵宗慈. 全球三维环流模式模拟短期气候变化的能力. 气象科技, 1989 年第 2 期, 14—15.
- 22 ECMWF ed. Proceeding of the ECMWF Workshop on predictability in the medium and extended range. Reading, 16—18 May, 1988.
- 23 Yamada, S., S. Maeda, T. Kudo, T. Iwasaki and T. Tsuyuki. Dynamical one-month forecast experiments with the JMA global prediction model. *J. Meteor. Soc. of Japan*, 1991, **69**: 153—159.
- 24 Grotch S. L. and M. C. MacCracken. The use of general circulation models to predict regional climate changes. *J. Climate*, 1991, **4**: 286—303.
- 25 Zhao Zongci and Ding Yihui. Sensitivity experiments and assessment of climatic changes in China induced by greenhouse effect. *J. Environ. Sci.*, 1990, **2**: 73—84.
- 26 Giorgi, F. Simulation of regional climate using a limited area model nested in a GCM. *J. Climate*, 1990, **3**: 941—963.
- 27 Dickinson R. E., R. M. Erico, F. Giorgi, G. T. Bates. A regional climate model for the western United States. *Climatic Change*, 1989, **15**: 383—422.

ADVANCES ON THE SIMULATION OF HUMAN ACTIVITY EFFECTS UPON CLIMATE CHANGE

Zhao Zongci

(The Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract

The recent advances on the numerical simulation of human activity effects upon the global climate change have been presented in the paper.

Key words: Human activities; Climatic simulation; Climate change.