

温室效应引起的东亚区域气候变化

陈起英 俞永强 郭裕福 张学洪

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘要 用中国科学院大气物理研究所的两层大气和二十层大洋环流模式耦合的海气模式进行了控制试验和瞬变响应试验两个长期积分, 并用它们的差异来分析大气中二氧化碳含量加倍所引起的东亚区域的气候变化。二氧化碳加倍以后, 东亚年平均温度升高, 降水增加, 土壤湿度也是增加的, 但存在着显著的季节性和区域性的差异。因此, 又把东亚分成8个区, 来详细探讨二氧化碳增加所引起的区域气候变化。选取了3个具有代表性的气候量: 温度、降水和土壤湿度。二氧化碳加倍以后, 温度的增加和土壤湿度的增加主要出现在冬半年的高纬度, 降水增加的最大值也出现在冬半年的高纬度。另外, 还初步分析了二氧化碳浓度加倍所引起的温度和降水年际变率的变化。

关键词 温室效应 二氧化碳 气候变化

1 前言

近一百年来, 由于二氧化碳浓度增加造成了全球气候增暖。这个问题已经引起各国政府和科学家们的重视, 已经有许多不同复杂程度的数值气候模式被用来研究气候系统对于温室气体强迫的敏感性。但过去大多数的数值模拟都是用大气环流模式耦合到一个典型的50 m深的混合层海洋模式上或者耦合到一个把混合层以下的热输送用扩散过程进行参数化的海洋模式上。这种模式的缺点是不能模拟气候变化对海洋环流变化的响应, 特别是对海洋的热输送和深层海洋的热储存变化的响应。然而, 这些过程强烈影响到气候系统对外界强迫的平衡气候和瞬变气候响应。因此, 只有用完全耦合的大气-海洋环流模式才能对温室气体增加造成的气候变化作出比较可靠的估计^[1]。80年代中后期, 这方面的研究工作有了比较迅速的发展。

模式模拟的气候变化为政府的有关决策提供必要的依据, 政府需要根据气候模式提供的平均气候变化以及气候变率变化的信息, 尤其是区域气候变化和季节气候变化类型的信息来作出相应的决策。因此, 政府和科学家们更感兴趣的是全球气候变化对于区域气候的影响。例如, Whetton等比较了不同大气环流模式和海气耦合模式模拟的澳大利亚的区域气候及变化^[2]。然而, 正是在区域的尺度上, 全球环流模式有更大的缺陷。这主要与模式较低的分辨率、模式对中小尺度物理过程的参数化不完善有关。近几年, 一些国家已经发展了一些嵌套的有限区域气候模式用于区域气候的模拟^[3,4]。但由于计算机资源的限制以及其他一些原因, 这方面的研究工作还是初步的, 所以现阶段用全球气候模式来模拟区域气候及变化仍然具有重要的意义。

东亚是一个人口比较密集的地区, 农业生产对气候的依赖性很大, 研究包括中国这

个农业大国在内的东亚区域在二氧化碳增加以后的气候变化,具有重要的理论和实用价值。本文的目的就是要通过全球海气耦合模式提供的详尽数据源来分析评估二氧化碳浓度加倍以后,东亚地区(主要是中国)的区域气候变化。

2 模式和方法介绍

本文所使用的模式是张学洪等人在中国科学院大气物理研究所已有的两层大气环流模式和二十层大洋环流模式的基础上发展出的一个新的海气耦合模式(IAP CGCM)。两层大气模式^[5,6]的水平分辨率为 $4^{\circ} \times 5^{\circ}$ 。模式的主要预报量包括地面气压、温度、水平风速、水汽含量、土壤温度、湿度及雪量,诊断量有垂直速度、位势高度、密度、云和地面反照率等。模式的物理过程包括太阳短波辐射、地面和大气的长波辐射、大尺度凝结和小尺度的积云对流等加热过程以及大气和下垫面之间的热量、水份和动量的湍流交换过程。二十层海洋环流模式是在原来的四层大洋环流模式的基础上发展来的,其中在北冰洋地区引入了一个薄层热力学海冰模式。海表是自由面,并在方程中引入纬向平均的温度、盐度及密度的标准层结,采用了 η 垂直坐标系,应用了表面波和内波分离和耦合的方法,温盐过程在水平方向采用隐式扩散、在垂直方向采用显式扩散方案^[7]。

这个新的海气耦合模式不但能够较好地重现全球平均气候状态和年际变化的特征,也能够合理地模拟出大气中二氧化碳浓度增加引起的全球气候变化,而且模式对区域平均气候也显示了一定的模拟能力^[8~10]。

本文即是用此海气耦合模式已进行的两个长期耦合积分试验的结果来分析增强的温室效应引起的东亚区域气候变化。这两个试验之一是控制试验,二氧化碳保持现有值 345×10^{-6} (体积浓度比)不随时间变化,以独立的海洋和大气模式的平衡态为初值耦合积分了130年;另一个是加倍试验,以控制试验第35年的结果为初值积分了95年,前70年二氧化碳以每年1%的速率增加,在第70年达到初值的两倍,即增加至 690×10^{-6} (体积浓度比)。此后,模式在二氧化碳浓度维持初值二倍的条件又积分了25年。把加倍试验在二氧化碳加倍前后的十年平均值与控制试验在相同时段内的十年平均值相减,来定量地分析由二氧化碳浓度加倍引起的东亚区域的平均气候变化;而用加倍试验和控制试验在加倍前后30年的年际变率的比值来分析年际变率的变化。

3 IAP CGCM 模拟的东亚区域平均气候状态的变化

二氧化碳浓度加倍以后,东亚地区($70^{\circ} \sim 140^{\circ} \text{E}$, $10^{\circ} \sim 62^{\circ} \text{N}$)气候变化的总体趋势是变暖、变湿。

东亚年平均温度升高 3.6°C 。冬季 4.5°C ,春季 3.5°C ,夏季 2.5°C ,秋季 3.7°C 。显然冬季增温幅度最大,夏季增温最小。东亚年平均降水增加 0.24 mm/d ,即增加9.8%。冬季降水略有减少,减少 0.02 mm/d ,即减少1.3%;春季增加 0.23 mm/d ,即增加11.2%;夏季增加 0.55 mm/d ,即增加14.9%;秋季增加 0.18 mm/d ,即增加7.6%。东亚年平均土壤湿度增加 0.62 cm ,即增加10%。冬季增加 1.16 cm ,即增加19.6%;春季增加 0.71 cm ,即增加9.7%;夏季增加 0.07 cm ,即增加1.2%;秋季增加

0.54 cm, 即增加 9.6%。无论是从降水变化量值上看还是从降水变化的百分率来看, 都是夏季降水增加最多。而土壤湿度从变化量值上和变化的百分率上都是冬季增湿最大, 夏季增湿最小。

从温度、降水和土壤湿度变化的纬向平均分布 (图 1) 看, 温度增加的幅度随着纬度的增加而增大; 降水在高纬增加的百分率要大于低纬度, 中纬度的降水则减少; 土壤湿度也是高纬增加较大。

为了更详细地讨论东亚区域的气候变化, 又把东亚分成 8 个区域, 分区方法采用《中国自然地理图集》的自然地理区划^[11]。这种分区方法综合考虑了热量、水份、植被等条件。一区至八区分别是东北地区、华北地区、华中地区、西南地区、华南地区、内蒙古地区、西北地区 and 青藏地区。

下面给出二氧化碳加倍时, 东亚各区域的平均气候的变化。

3.1 温度

二氧化碳浓度加倍后, 各区温度增加幅度不同。一区增加 4.6℃, 二区 4.4℃, 三区 3.0℃, 四区 2.8℃, 五区 1.3℃, 六区 4.8℃, 七区 4.1℃, 八区 3.9℃。增温最明显的是内蒙古地区, 其次是东北地区、华北地区和西北地区。增温最小的是华南地区。西南和华中地区增温也较小。

表 1 给出的是二氧化碳浓度加倍后, 各区各月的温度变化。下面给出各区温度变化的具体特点。

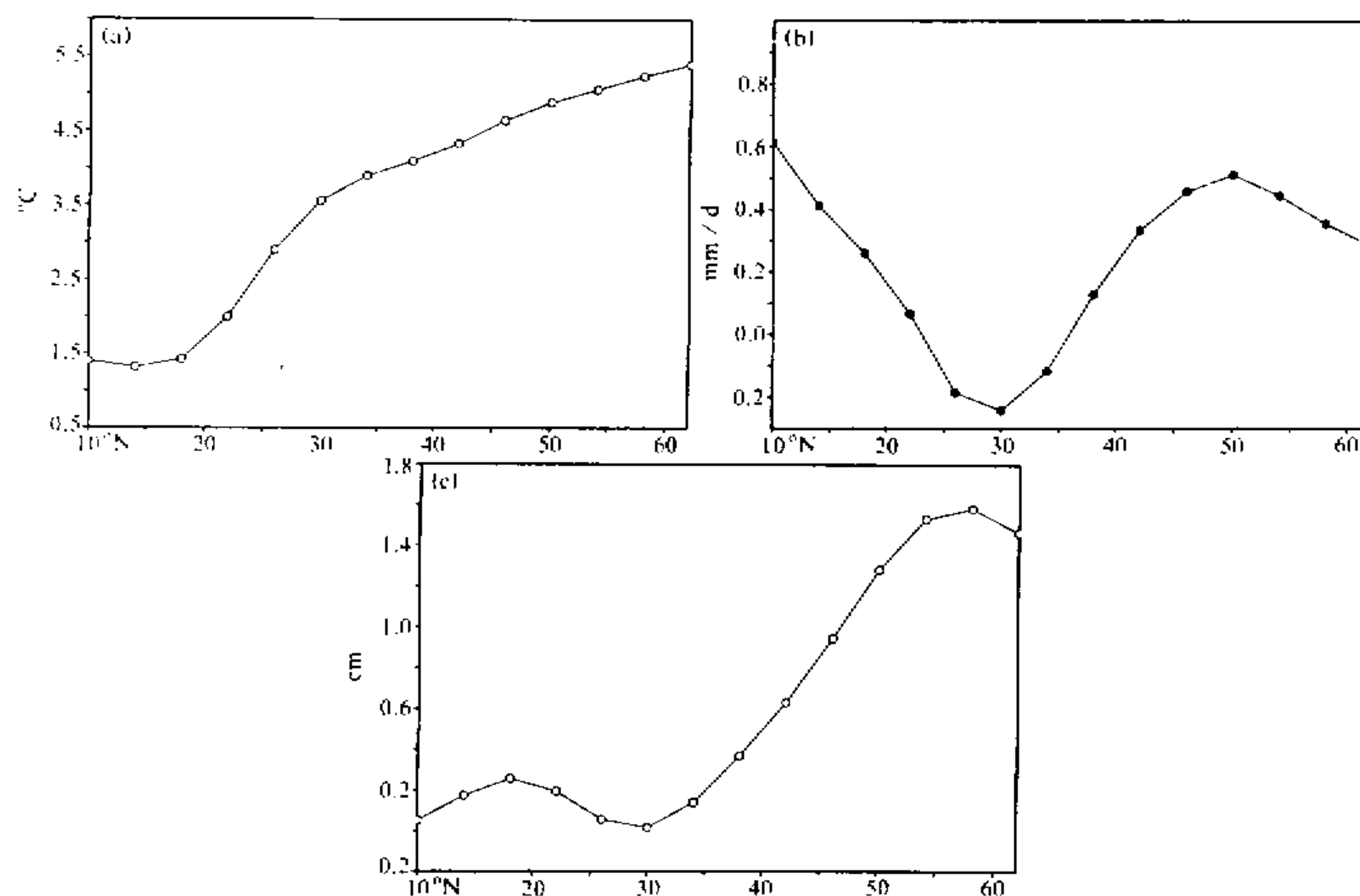


图 1 二氧化碳加倍时东亚地区纬向平均的气候变化
(a) 温度变化, (b) 降水变化, (c) 土壤湿度变化

表 1 IAP CGCM 模拟的未来各区平均温度变化

气候区	温度变化 / °C											
	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
1	5.9	5.7	5.6	3.9	2.8	2.0	3.0	3.2	3.3	4.8	7.8	7.3
2	5.8	5.6	5.7	3.4	3.4	3.7	4.7	3.4	3.0	3.2	4.9	5.6
3	4.0	3.6	4.4	2.5	2.7	3.3	1.1	0.7	2.0	4.2	3.8	3.9
4	3.2	3.2	3.7	2.1	2.2	3.6	3.3	1.0	2.0	3.2	3.3	3.1
5	2.2	1.9	2.3	1.2	1.0	1.0	-1.8	-1.1	0.6	3.3	3.3	2.4
6	6.1	5.9	6.0	3.6	3.2	3.0	4.6	4.1	3.2	3.8	6.7	6.7
7	4.8	4.1	4.5	3.2	3.3	3.4	4.0	4.7	3.4	3.3	5.5	5.4
8	2.8	2.9	3.7	3.3	4.2	4.5	6.0	5.6	4.3	3.0	3.4	3.1

东北地区, 温度增加较为明显, 且各月有较大的差异。增温最大的是 11、12 月, 增温达 7.0°C 以上; 增温最小的是 6 月, 增加 2.0°C。冬、春、夏、秋分别增温 6.3°C、4.1°C、2.7°C、5.3°C。冬季增温最明显, 三个月的月平均增温都大于 5.5°C; 夏季增温最小, 三个月的月平均增温都是全年 (除 5 月外) 最小的。

华北地区, 温度增加也较为明显, 各月温度增加差异较小。增温最大的月是 1 月, 增加 5.8°C; 增温最小的是 9 月, 增加了 3.0°C。冬、春、夏、秋分别增温 5.6°C、4.2°C、3.9°C、3.7°C。冬季增温最明显, 三个月的月平均增温均大于 5.5°C; 秋季增温最小。各季差别不如东北区明显。

华中地区, 温度增加较小, 各月温度增加的差异较大。增温最大的是 3 月, 增温 4.4°C; 增温最小的是 8 月, 只增加了 0.7°C。冬、春、夏、秋分别增温 3.8°C、3.2°C、1.7°C、3.3°C, 也是冬季增温最明显, 夏季增温最小。

西南地区, 温度增加较小, 且各月增温差别也小。增温最大的是 3 月, 增加了 3.7°C; 增温最小的是 8 月, 增加了 1.0°C。冬、春、夏、秋分别增温 3.1°C、2.7°C、2.6°C、2.9°C, 各季差别很小。增温最明显的是冬季, 夏季增温较小。

华南地区, 温度增加最小, 甚至在个别月出现降温, 7 月和 8 月温度分别下降 1.8°C 和 1.1°C。增温最大的是 10 月和 11 月, 只增加了 3.3°C。冬、春、夏、秋分别增温 2.2°C、1.5°C、-0.7°C、2.4°C。增温较明显的是秋季和冬季, 而夏季却出现了降温。

内蒙古地区, 全年平均温度增加是最多的, 但是其月平均增温的最大值小于东北地区。全国月平均增温极值出现在东北地区的 11 月和 12 月。内蒙古地区温度增加最多的是 11 月和 12 月, 温度增加 6.7°C; 其次是 1 月、3 月和 2 月, 增温都很明显; 增温最小的是 6 月, 温度增加 3.0°C。冬、春、夏、秋分别增温 6.2°C、4.3°C、3.9°C、4.6°C。同样是冬季增温最明显, 夏季最小。

西北地区, 温度增加仍较明显, 各月增温幅度变化不大。增温最明显的是 11、12 月, 分别增温 5.5°C 和 5.4°C; 增温最小的是 4 月, 温度增加 3.2°C。冬、春、夏、秋分别增温 4.8°C、3.7°C、4.0°C、4.1°C。增温最明显的是冬季, 最小的是春季, 但各季差异较小。

青藏地区, 温度也有较明显增加, 但各月增温幅度有差异, 且与其他地区有明显差别。增温较明显的是夏季的三个月, 最明显的是 7 月, 温度增加 6.0°C。增温较小的却

是冬季的三个月。冬、春、夏、秋平均分别增温 3.0°C 、 3.7°C 、 5.3°C 、 3.5°C 。

综合各区, 一般都是冬季增温较明显(华南秋、冬都明显), 而夏季增温较小(华北夏、秋都小; 西北地区春季较小)。华南和青藏地区是两个比较特殊的地区, 华南夏季出现降温, 而青藏地区夏季增温最明显, 冬季增温相对较小。另外, 还可以发现增温明显的区均是淮河以北的北方地区, 而南方各区温度增加相对较小。

3.2 降水

二氧化碳浓度加倍时, 各区的降水变化也是不相同的。从降水量值上看, 一区增加 0.36 mm/d , 二区增加 0.03 mm/d , 三区减少 0.007 mm/d , 四区增加 0.34 mm/d , 五区增加 0.41 mm/d , 六区增加 0.19 mm/d , 七区增加 0.35 mm/d , 八区增加 0.22 mm/d ; 从降水变化的百分率来看, 一区增加 19.7% , 二区增加 1.5% , 三区减少 0.3% , 四区增加 14.6% , 五区增加 19.2% , 六区增加 13.4% , 七区增加 19.2% , 八区增加 11% 。增加最为明显的是东北地区、华南地区、西北地区; 西南地区、内蒙古地区和青藏地区降水增加也较为明显; 而华北地区降水增加非常小, 华中地区降水反而是减少的, 但减少并不明显。

表 2 给出的是二氧化碳浓度加倍前后, 各区各月降水变化的百分率。各区降水变化的具体特点如下:

表 2 IAP CGCM 模拟的未来各区平均降水变化

气候区	降水变化 / %											
	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
1	13.7	23.5	30.7	8.3	20.1	35.4	23.5	20.9	26.2	-9.6	9.3	6.9
2	-8.8	-4.3	-1.8	-5.9	-17.7	-6.2	2.2	23.6	33.4	12.1	12.6	-12.8
3	-50.2	-51.9	-9.7	4.5	-10.3	1.1	36.1	16.1	-6.1	-33.7	-10.2	-44.6
4	-3.5	-9.1	11.3	32.8	15.4	2.5	2.1	33.9	12.8	8.5	28.1	40.5
5	-36.8	-32.5	52.3	135.9	32.9	28.5	45.7	25.6	-11.5	-38.0	-28.9	-39.1
6	18.3	22.0	27.5	-5.1	-2.5	17.6	7.5	27.7	52.9	4.0	11.1	8.7
7	26.8	17.4	19.3	9.2	14.1	24.7	10.6	1.6	37.1	64.2	22.3	29.0
8	7.7	-6.5	-3.5	2.6	18.2	17.4	-5.8	-0.3	25.2	70.5	31.3	29.9

东北地区, 降水增加最明显, 除了 10 月, 全年各月降水都是增加的, 而且各月变化差异不大。增加最明显的是 6 月, 增加 35.4% , 2、3、5、7、8、9 月均增加 20% 以上。冬、春、夏、秋降水的变化分别是: 冬季增加 14.9% , 春季增加 18.2% , 夏季增加 26.3% , 秋季增加 8.7% 。除秋季, 各季增加都较明显, 夏季最明显。

华北地区, 年平均降水变化振幅较小, 但月平均变化差异较大。增加较明显的是 9 月和 8 月, 分别增加 33.4% 和 23.6% ; 减少最明显的是 5 月, 减少 17.7% , 其次是 12 月。全年降水减少的有 7 个月, 但其中 5 个月减少幅度都较小, 故全年平均还略有增加。冬、春、夏、秋降水的变化分别是: 冬季减少 7.4% , 春季减少 10.1% , 夏季增加 6.5% , 秋季增加 21.8% 。秋季增加最明显, 春季减少较明显。

华中地区, 降水减少较为明显, 一年中有 8 个月降水是减少的, 减少最明显的是 2 月和 1 月, 分别减少 51.9% 和 50.2% ; 夏季三个月都是增加的, 增加最明显的是 7

月, 增加 36.1%。全年各月降水变化差异较大。冬、春、夏、秋降水的变化分别是: 冬季减少 50.5%, 春季减少 4.6%, 夏季增加 16.3%, 秋季减少 14.7%。冬季降水减少很明显, 夏季增加和秋季减少较明显, 春季减少不明显。

西南地区, 降水增加较为明显, 除 1 月和 2 月, 全年其他月降水都是增加的, 且各月降水变化差异不是很大。降水增加最明显的是 12 月, 增加 40.5%, 其次是 8 月和 4 月; 1 月和 2 月降水减少都不明显。冬、春、夏、秋降水的变化分别是: 冬季增加 2.7%, 春季增加 20.6%, 夏季增加 11.5%, 秋季增加 13.1%。各季降水都是增加的, 春季最明显, 冬季最不明显, 夏、秋季较明显, 但各季差别不是很大。

华南地区, 全年平均降水仍有较明显的增加, 但各月的降水变化差异也较大。降水增加最明显的是 4 月, 增加 135.9%, 增加一倍以上。降水增加占半年时间 (春、夏季), 且各月增加均超过 25%。降水减少也有 6 个月 (秋、冬季), 且除 9 月和 11 月外, 均超过 30%。降水增加和减少都较为明显, 但减少幅度仍小于增加。冬、春、夏、秋降水的变化分别是: 冬季减少 37.4%, 春季增加 54.5%, 夏季增加 32.7%, 秋季减少 21%。各季变化均较明显, 春季增加很明显, 冬季减少最明显。

内蒙古地区, 降水增加较明显。除 4、5 月, 全年其他各月降水均是增加的, 且各月降水变化差异不大。降水增加最明显的是 9 月, 增加 52.9%; 降水减少的 4、5 两个月, 幅度都较小。冬、春、夏、秋降水的变化分别是: 冬季增加 17.0%, 春季增加 2.6%, 夏季增加 17.3%, 秋季增加 23%。除了春季较小外, 各季增加都较明显, 而且差异小。

西北地区, 降水有比较明显的增加, 全年各月降水都是增加的, 且各月降水变化差异不是很大。降水增加最明显的是 10 月, 增加 64.2%, 最不明显的是 8 月, 只增加了 1.6%。冬、春、夏、秋降水的变化分别是: 冬季增加 23.8%, 春季增加 13.7%, 夏季增加 13.7%, 秋季增加 39%。各季增加都较明显, 秋季最明显, 冬季次之, 春、夏较之稍弱。

青藏地区, 降水增加仍较明显, 且各月降水变化的差异较大。降水各月平均有增有减, 但减少的 4 个月幅度都较小; 增加最明显的是 10 月, 增加 70.5%。冬、春、夏、秋降水的变化分别是: 冬季增加 7.1%, 春季增加 6.7%, 夏季增加 4.0%, 秋季增加 38.6%。各季均是增加的, 但秋季增加显著, 其他季节增加都不明显。

大部分地区大部分季节内降水都是增加的, 夏季各区均为增加。降水增加最明显的季节一般是秋季或夏季。而西南地区和华南地区比较特殊, 是春季增加最明显。从地区上看, 西北、东北、内蒙古、西南、青藏等地区增加明显, 大部分月份降水都是增加的; 华中地区以减少为主, 尤以冬季明显; 华南春、夏两季的增加和冬、秋两季的减少都十分明显。

3.3 土壤湿度

二氧化碳浓度加倍后, 各区土壤湿度有增有减。一区增加 0.16 cm, 二区减少 0.10 cm, 三区减少 0.04 cm, 四区增加 0.21 cm, 五区增加 0.43 cm, 六区增加 0.16 cm, 七区增加 1.21 cm, 八区增加 0.63 cm。从土壤湿度变化的百分率来看, 一区增加 3.6%, 二区减少 4.0%, 三区减少 0.9%, 四区增加 14.2%, 五区增加 9.3%, 六区增加 7.3%, 七区增加 39.6%, 八区增加 22.7%。增加最明显的是西北地区和青藏地区; 东

北地区土壤湿度增加较少; 华北和华中地区土壤湿度是减少的。

表 3 给出的是二氧化碳浓度加倍时, 各区各月的土壤湿度变化的百分率。各区土壤湿度变化的具体特点如下:

表 3 IAP CGCM 模拟的未来各区平均土壤湿度变化

气候区	土壤湿度变化 / %											
	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
1	7.7	14.6	16.1	-7.7	-10.1	10.3	9.8	3.5	8.7	-5.2	-0.8	5.4
2	-0.8	-1.9	-13.6	-14.0	-18.6	-10.3	-7.0	8.1	14.4	4.5	10.3	4.7
3	-1.6	-3.9	-7.6	-1.9	-8.1	-4.4	15.6	12.4	3.9	-10.5	-1.0	-1.2
4	48.7	2.6	-8.1	17.5	4.4	-6.8	1.2	60.9	21.6	0.4	40.1	71.3
5	0.1	0.1	1.2	9.9	8.6	10.3	32.0	30.0	15.8	-6.9	-4.3	-0.1
6	17.2	23.8	13.5	-9.5	-19.7	2.3	0.4	7.0	31.6	15.3	19.0	20.2
7	123.9	132.0	79.4	22.1	-8.1	-15.8	-8.4	-18.2	5.7	68.4	94.7	113.3
8	86.7	76.2	66.6	40.4	5.8	-14.3	-31.7	-29.5	-7.2	38.4	84.9	95.0

东北地区, 土壤湿度的变化不很明显, 月平均变化有增有减, 但是增减幅度都较小。增加最明显的是 3 月, 增加 16.1%; 减少最多的是 5 月, 减少 10.1%。冬、春、夏、秋土壤湿度的变化分别是: 冬季增加 9.3%, 春季减少 1.3%, 夏季增加 7.9%, 秋季增加 0.5%。冬季和夏季土壤湿度较其他季节增加略为明显, 春季的减少和秋季的增加都非常不明显。

华北地区, 土壤湿度的变化也不明显, 增减幅度都较小, 半年多时间土壤湿度是减少的, 而另 5 个月是增加的。土壤湿度增加最明显的是 9 月, 增加了 14.4%; 而减少最明显是 5 月, 减少了 18.6%。冬、春、夏、秋土壤湿度的变化分别是: 冬季增加 0.6%, 春季减少 15.4%, 夏季减少 3.5%, 秋季增加 9.7%。春季土壤湿度减少较明显, 3、4、5 月均减少较为明显, 秋季土壤湿度增加也较明显, 夏季略有减少, 冬季各月变化都很小。

华中地区, 与一区和二区类似, 也是土壤湿度有增有减, 变化幅度很小, 不同的是三区土壤湿度一年中有 9 个月都是减少的。土壤湿度增加最明显的是 7 月, 增加 15.6%; 而减少最明显的是 10 月, 减少 10.5%。冬、春、夏、秋的变化分别是: 冬季减少 2.3%, 春季减少 5.8%, 夏季增加 7.3%, 秋季减少 2.3%。夏季略为增加, 其他季节均为减少, 春季减少更明显些。三区的土壤湿度变化是八个区中最小的。

西南地区, 土壤湿度的变化较为明显, 各月的差异较大。大部分月份都是增加的, 只有 3 月和 6 月是减少的, 而且减少不明显。增加最明显的是 12 月, 增加 71.3%。冬、春、夏、秋的变化分别是: 冬季增加 39.6%, 春季增加 6.6%, 夏季增加 12.7%, 秋季增加 17.5%。各季土壤湿度都是增加的, 但最明显的是冬季, 春季不明显。

华南地区, 土壤湿度的变化较为明显, 且各月差异也较明显。全年大部分月份都是增加的, 增加最明显的是 7 月和 8 月, 分别增加了 32% 和 30%。土壤湿度减少的 10、11、12 月, 幅度都很小。冬、春、夏、秋的变化分别是: 冬季增加 0.1%, 春季增加 6.8%, 夏季增加 24.5%, 秋季增加 2.9%。各季平均土壤湿度都是增加的, 以夏季为显

著, 冬季各月变化都非常小。

内蒙古地区, 土壤湿度变化也较明显, 且各月差异较明显。除 4、5 月, 其他月份土壤湿度都是增加。增加最明显的是 9 月, 增加 31.6%; 5 月土壤湿度减少较明显, 减少 19.7%。冬、春、夏、秋土壤湿度的变化分别是: 冬季增加 20.5%, 春季减少 5.8%, 夏季增加 3.2%, 秋季增加 21.1%。冬、秋季增加较明显, 春季略减少, 夏季略增加。

西北地区, 土壤湿度变化最明显, 各月差异也很大。增加最明显的是冬季的三个月, 三个月均增加一倍以上; 减少较明显的是 6 月和 8 月, 但比起增加的幅度, 减少的幅度小多了。冬、春、夏、秋土壤湿度的变化分别是: 冬季增加 123.5%, 春季增加 24.2%, 夏季减少 14.3%, 秋季增加 61.9%。各季的变化都很明显, 冬季增加一倍以上, 秋季和春季增加也明显, 夏季减少比起其他季节的增加要小多了。

青藏地区, 土壤湿度的变化也很明显, 增加和减少的幅度都较大, 但减少幅度仍小于增加幅度。增加最明显的是 12 月, 增加 95%, 除 5 月和 10 月, 其他 6 个月增湿的幅度都达到 40% 以上; 减少较明显的是 7 月和 8 月, 分别减少 31.7% 和 29.5%。冬、春、夏、秋土壤湿度的变化分别是: 冬季增加 85.5%, 春季增加 29.7%, 夏季减少 22.6%, 秋季增加 36.4%。各季变化都明显, 最明显的是冬季, 夏季减少很明显, 远大于其他地区的减少。

综合各区, 西部地区的土壤湿度变化较明显, 尤其是西北地区和青藏地区, 冬季的增加与夏季的减少都比其他地区显著多了。土壤湿度增加较明显的地区, 一般都是冬季增加较明显; 华南地区比较特殊, 夏季增加最明显, 冬季变化非常小。另外, 值得注意的是, 虽然全年平均只有华北和华中地区土壤湿度是减小的, 但季节平均除了西南和华南地区, 其他区都有土壤湿度减少的季节。西北和青藏地区比较特殊, 是夏季土壤湿度减少, 而其他区均是春季减少或者春季减少更明显。

4 IAP CGCM 模拟的东亚区域气候年际变率的变化

气候年际变率的较小变化能导致极端事件发生频率比较大的变化, 所以有必要分析讨论二氧化碳加倍以后温度和降水年际变率的变化。由于 IAP CGCM 未包括陆面过程以及北极地区的海冰的年际变化没有模拟出来, 模式模拟的年际变率偏低。故这里对于年际变率的变化只做一些简单初步的分析。二氧化碳浓度加倍以后年际变率的变化, 用均方差比率 F 来表示: $F = \sigma_2 \times \text{CO}_2 / \sigma_1 \times \text{CO}_2$, $F > 1$ 表示变率增加, $F < 1$ 表示变率减少。

二氧化碳浓度加倍时, 东亚平均年平均温度的年际变率增加, 是加倍之前的 1.40 倍; 季节平均温度的年际变率也均增加, 冬、春、夏、秋分别是加倍之前的 1.01, 1.15, 1.21 和 1.22 倍。东亚平均年平均降水的年际变率也增加, 是二氧化碳浓度加倍之前的 1.13 倍; 季节平均降水的年际变率冬、春、夏、秋分别是增加之前的 1.14, 1.24, 1.20 和 1.09 倍。

下面讨论二氧化碳浓度加倍时, 各区平均的温度和降水年际变率的变化。

二氧化碳浓度加倍时, 各区年平均温度的年际变率均增加, 分别是加倍之前的: 东

北 1.46 倍, 华北 1.61 倍, 华中 1.44 倍, 西南 1.32 倍, 华南 1.61 倍, 内蒙古 1.57 倍, 西北 1.47 倍, 青藏 1.15 倍。华北和华南增加最明显, 青藏地区较小。

表 4 是各区季节平均温度的年际变率的变化, 可见年际变率变化的季节差异。淮河以南的华中、西南、华南地区和内蒙古地区各季年际变率绝大部分均为增加; 东北和华北地区只有夏季是增加的, 且比较明显; 而西北和青藏地区只有夏季有明显减少。二氧化碳浓度加倍以后, 各区年平均降水的年际变率大部分也是增加的, 分别是加倍之前的: 东北 0.96 倍, 华北 0.89 倍, 华中 0.79 倍, 西南 0.93 倍, 华南 1.14 倍, 内蒙古 1.15 倍, 西北 1.17 倍, 青藏 1.25 倍。只有华北和华中有较明显的减少, 青藏地区增加最明显。

表 4 IAP CGCM 模拟的未来各区温度年际变率的变化

	东 北	华 北	华 中	西 南	华 南	内 蒙 古	西 北	青 藏
冬	0.83	0.88	1.13	1.23	1.18	1.20	1.05	0.94
春	0.89	0.85	0.97	1.43	1.64	1.36	1.10	1.21
夏	1.40	1.51	1.69	1.45	1.22	1.00	0.85	0.81
秋	0.86	1.01	1.39	1.54	1.45	1.45	1.41	1.49

表 5 是各区季节平均降水的年际变率的变化。各区秋季都有较明显的增加, 而冬季除青藏地区都略减小。东北、西北、华南都各有一季节减小比较明显。

表 5 IAP CGCM 模拟的未来各区降水年际变率的变化

	东 北	华 北	华 中	西 南	华 南	内 蒙 古	西 北	青 藏
冬	0.81	0.90	0.98	0.94	0.91	0.96	0.96	1.26
春	1.12	0.95	1.41	1.14	0.98	1.15	0.83	1.22
夏	1.26	0.95	1.75	1.19	0.87	1.44	1.60	1.20
秋	1.13	1.28	1.42	1.14	1.37	1.26	1.35	1.63

5 结论

用中国科学院大气物理所的一个海气耦合模式对二氧化碳加倍引起的东亚区域的气候变化进行了模拟, 得到以下初步结论。

二氧化碳加倍时, 东亚的总体趋势是温度升高, 降水增加, 土壤湿度也增加, 但气候变化存在着较大的区域性和季节性的差异。

(1) 从区域上看, 温度增加在淮河以北的北方地区明显, 而南方各区温度增加较小。温度增加的幅度随着纬度的增大而增大, 增温最明显的是内蒙古地区, 但月平均增温的最大值却出现在东北地区。在整个区域普遍增温的背景下, 华南地区却在夏季出现了降温。各个地区一般都是冬季增温最明显 (华南秋、冬都明显), 而夏季增温较小 (华北夏、秋都小, 西北春季较小), 而青藏地区夏季增温最明显, 最不明显的是冬季。温度增加在高纬度的冬季最明显与冰的反馈有很大关系。温度升高, 海冰面积减少, 入射太阳短波辐射增加, 造成更高的表面空气温度, 这种影响在夏季相对较小。值得指出

的是,低纬度降温的原因还需要进一步分析。

(2) 从区域上看,大部分地区大部分季节降水是增加的,尤以夏半年明显,且高纬增加比中低纬更为明显,处于中纬度的华北和华中两区降水在大部分月份则是减少的,尤以冬季更明显。降水增加最为明显的是东北地区、西北和华南地区。各区降水增加最明显的季节一般是秋季和夏季,西南和华南地区是春季增加最明显,降水增加不明显或者减少最明显的一般是冬、春季。夏半年,陆地温度增加更大,增强了海陆对比,东亚夏季风增强,再加上有更多的水汽来自变得更暖的海洋,降水增加是合理的。

(3) 从区域上看,西部地区的土壤湿度增加较明显,尤其是西北地区和青藏地区,中部地区的华北和华中是减少的,华北春季尤为明显。土壤湿度变化一般都是冬季增加最明显,华南地区是夏季增加最明显,冬季变化非常小。此外,除了西南、华南地区是各季土壤湿度都增加外,西北和青藏地区是夏季土壤湿度减少,而其他区均是春季减少或春季减少更明显。土壤湿度变化的原因比较复杂,与温度、降水的变化有关,高纬地区还与融雪有关。

二氧化碳加倍时,东亚地区平均的年平均和季节平均的温度和降水的年际变率都是增加的。各分区年平均温度变率也均增加,但降水变率华北和华中地区减少较明显。分区季节平均温度和降水的年际变率有增有减。

由于模式对未来气候变化的模拟尚存在许多不确定性,用分辨率不高的全球气候模式来模拟区域气候变化的结果也有待进一步探讨,通过不同模式之间结果的比较,并分析其变化的物理基础,有助于确定模式结果的可信度,这是下一步工作应该予以考虑的。

致谢 作者感谢金向泽先生对本文提出的有益的建议。本研究由攀登项目PD-26和国家重点实验室LASG联合资助。本文所用到的模式的两个长期积分资料是陈克明博士在法国国家科研中心动力气象实验室(LMD)完成的,其他的计算都是在中国科学院大气物理所的计算机室的CONVEX机上完成的。

参 考 文 献

- 1 Cubasch U., K. Hasselmann, H. Hock, E. Maier-Reimer, U. Mikolajewicz, B.D. Santer and R. Sausen, 1992, Time-dependent greenhouse warming computations with a coupled ocean-atmosphere model, *Clim. Dyn.*, 8, 55~69.
- 2 Whetton, P.H., P.J. Rayner, A.B. Pittock, and M.R. Haylock, 1994, An Assessment of Possible Climate Change in the Australian Region Based on an Intercomparison of General Circulation Modeling Results, *J. Clim.*, 7, 441~462.
- 3 Giorgi, F., 1990, On the simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model, *J. Climate*, 3, 941~963.
- 4 Liu, Y. F. Giorgi and W. M. Washington, 1994, Simulation of summer monsoon climate over east Asia with an NCAR Regional Climate model, *Mon. Wea. Rev.*, 122, 2331~2348.
- 5 Zeng, Qingcun, Zhang Xuehong, Liang Xinzhong, Yuan Chongguang and Chen Shengfang, 1989, Documentation of IAP Two-Level AGCM. TRO44, DOE/ER/60314-H1, U.S.DOE., Feb. 1989, 383.
- 6 Zeng, Qingcun, and Zhang Xuehong, 1987, Available energy conservative Schemes for primitive equations of spherical baroclinic atmosphere, *Chinese J. Atmos. Sci.*, 11, 121~142.
- 7 Zhang Xuehong, Chen Keming, Jin Xiangze, Lin Wuyin and Yu Yongqiang, 1996, Simulation of thermohaline

- circulation with a twenty-layer oceanic general circulation model, submitted to *J. of Theoretical and Applied Climatology*. (in press)
- 8 陈克明, 1994, IAP 全球海气耦合环流模式的改进及温室气体引起气候变化的数值模拟研究, 中国科学院大气物理研究所博士论文.
- 9 俞永强, 1994, IAP 海洋-大气耦合模式的全球和区域气候模拟及年际变率研究, 中国科学院大气物理所硕士论文, 10~23.
- 10 Guo Yufu, Yu Yongqiang, Chen Keming, Zhang Xuehong and Jin Xiangze, 1996, Mean climate state simulated by a coupled ocean-atmosphere model, submitted to *J. of Theoretical and Applied Climatology*. (in press)
- 11 焦北辰, 刘明光主编, 1984, 中国自然地理图集, 地图出版社, 96.

Climatic Change in East Asia Induced by Greenhouse Effect

Chen Qiying, Yu Yongqiang, Guo Yufu and Zhang Xuehong

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract Two long term integrations have been finished with 2-L AGCM coupled to 20-L OGCM developed in the Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences: one is control experiment, the other is transient CO₂-doubling experiment, their difference is used to analyze CO₂-induced climatic change in East Asia. After the doubling of CO₂, the annual mean surface air temperature, precipitation and soil moisture increase in East Asia, but the significant difference can be found in different seasons and regions. Thus, East Asia is divided into 8 sub-regions in order to study the regional climate change induced by doubling of CO₂ in detail. Three representative climatic variables: temperature, precipitation and soil moisture are selected to analyze the characteristic of regional climate change. After CO₂ doubled, the increase in temperature and soil moisture mainly located at high latitudes in winter half year, so is the maximum of increment of precipitation. Furthermore, the changes for interannual variability of temperature and precipitation due to the doubling of CO₂ are also analyzed.

Key words greenhouse effect carbon dioxide climatic change