

五个全球大气海洋环流模式模拟二氧化碳增加对气候变化的影响

赵宗慈

(国家气象局气象科学研究所)

提 要

本文总结五个应用较广的全球大气与海洋环流模式(GFDL, GISS, NCAR, OSU 与 UKMO),模拟由于人类活动造成大气中二氧化碳浓度增加对气候变化的影响.模拟表明,由于大气中二氧化碳浓度增加,将导致全球地面气温增暖大约 4℃,其中高纬与极区冬季增暖更明显.高纬与极区海冰和积雪融化增加.全球降水率与土壤湿度在部分地区明显增加,部分地区明显减少,引人注意的是中纬度地区土壤湿度可能变干燥.

本文还给出发达国家与发展中国家在能源战略的各种考虑下各自相应对大气中二氧化碳浓度的影响,以及展望未来由于人类活动的结果,将对全球大气与海洋温度的变暖 and 土壤湿度变化的影响.

关键词: 全球环流模式; 二氧化碳浓度; 气候变化; 模拟

一、引 言

由于人类活动造成气候变化的研究已成为世界各国气候工作者注目的重要问题之一.有关这方面的工作很多,其中有较长观测资料且研究较多的是由于人类活动造成大气中二氧化碳浓度的变化及对气候变化的影响^[1-3,11].

观测事实表明,随着工业化的发展,大气中二氧化碳浓度逐年明显增加.工业革命前的一百年(从 1750—1860 年),大气中二氧化碳浓度仅增加 6ppmv.但从 1940—1985 年的 45 年期间却增加了 46ppmv.

工业化以来大气中二氧化碳浓度的增长引起人们的关心与担忧,随之而来的即是考虑这种变化究竟会给气候带来多大影响.因而大量气候模式的模拟工作集中研究大气中二氧化碳浓度增加对气候变化的影响.本文在文献[4]与[12]的基础上总结近五年来五个较完整的全球三维大气海洋环流模式作二氧化碳敏感试验的结果,给出标志气候变化且影响人类生活最明显的几个物理量——如气温、降水、土壤湿度的纬向与全球地理分布上的变化,更多的物理量则只给出全球平均变化.最后给出对未来的展望,即有关对人类活动的估计以及未来全球

温度与湿度的可能分布.

二、全球大气海洋环流模式基本特征

本文选用的五个模式均为全球三维大气耦合海洋环流模式,模式的大气部分垂直方向是二层或多层的大气环流模式,模式的海洋部分则都是全球混合层海洋带海冰模式.

五个模式为美国普林斯顿大学地球物理流体动力学实验室的模式(简称 GFDL)^[5]、美国国家宇航局 Goddard 空间研究所的模式(简称 GISS)^[6]、美国国家大气研究中心(简称 NCAR)^[7]、美国俄勒冈州立大学气候研究所(简称 OSU)^[8]和英国气象局(简称

表 1 五个全球三维大气海洋环流模式的基本特征¹⁾

模 式 特 征	GFDL	GISS	NCAR	OSU	UKMO
水平范围,坐标	全球,纬度-经度	全球,纬度-经度	全球,纬度-经度	全球,纬度-经度	全球,纬度-经度
垂直范围,坐标	地面到 0hPa, $\sigma = (P-P_t) / (P_s-P_t)$	地面到 10hPa, $\sigma = (P-P_t) / (P_s-P_t)$	地面到 0hPa, $\sigma = (P-P_t) / (P_s-P_t)$	地面到 200hPa, $\sigma = (P-P_t) / (P_s-P_t)$	地面到对流层顶 $\sigma = P / P_s$
求解方法, 水平方向解	有限差分方法用在垂直方向与时间上,水平方向谱模式,15 波截断 ($4.5^\circ \times 7.5^\circ$)	有限差分方法用在垂直方向,时间与水平方向 ($8^\circ \times 10^\circ$)	有限差分方法用在垂直方向与时间上,水平方向谱模式,15 波截断 ($4.5^\circ \times 7.5^\circ$)	有限差分方法用在垂直方向,时间与水平方向 ($4^\circ \times 5^\circ$)	有限差分方法用在垂直方向,时间与水平方向 ($5^\circ \times 7.5^\circ$)
垂直层次	9	9	9	2	11
对流层中云的分布以及相应的辐射	在每一层允许云形成,云影响反照率和入射辐射的输送	在每一层允许云形成,云影响反照率和入射辐射的输送	在每一层允许云形成,云影响反照率和入射辐射的输送	在每一层允许云形成,云影响反照率和入射辐射的输送	在每一层允许云形成,云影响反照率和入射辐射的输送
入射太阳辐射	季节变化	季和日变化	季节变化	季节变化	季和日变化
海陆分布	实际的	实际的	实际的	实际的	实际的
地形	实际的	实际的	实际的	实际的	实际的
海洋	50m 深混合层	用气候值给定的混合层深度随季节变化,最大深度为 65m.给定季节海洋热辐合	50m 深混合层	60m 深混合层	50m 深混合层,给定季节海洋热辐合
陆地	一层预报模式	二层预报模式	一层预报模式	一层预报模式	一层预报模式
$1 \times \text{CO}_2$ 与 $2 \times \text{CO}_2$ 模拟的最后 10 年试验的平均时间长度(计算达平衡后)	模拟的最后 10 年	模拟的最后 10 年	模拟的最后 3 年,信度检验用模拟的最后 7 年	模拟的最后 10 年	$1 \times \text{CO}_2$ 取模拟的最后 8 年 $2 \times \text{CO}_2$ 取模拟的最后 5 年
信度检验	t 检验	双重 t 检验	Chervin (1981)	Chervin (1981)	双重 t 检验
主要参考文献	Manabe 和 Wetherald (1987, [5])	Hansen 等 (1984, [6])	Washington 和 Meehl (1984, [7])	Schlesinger 和赵宗慈 (1989, [8])	Wilson 和 Mitchell (1987, [9])

1) 根据文献[10],作者略有增改.

UKMO)^[9].五个模式的基本特征列在表 1 中.从表 1 看到,五个模式均采用实际的海陆分

布与地形分布,入射的太阳辐射均包括季节变化,且 GISS 与 UKMO 模式还包含日变化.模式的垂直方向与时间部分均用有限差分方法,水平方向 GFDL 与 NCAR 采用谱模式,其余三个模式均用差分网格模式.陆地模式除 GISS 采用复杂的两层外,其余四个模式均为简单的一层模式.海洋部分都采用简单的混合层不包括动力过程及深层海洋作用,这样较易于达到平衡状态,混合层深度从 50m 到 65m 不等.模式的控制试验($1 \times \text{CO}_2$)与敏感试验($2 \times \text{CO}_2$)是取大气与海洋模式计算基本达平衡状态后 3 年到 10 年平均值.

三、模拟结果

以下全部结果都是五个模式模拟大气中二氧化碳浓度增加,各种物理量的值与控制试验相应值的差值($2 \times \text{CO}_2$ 减 $1 \times \text{CO}_2$).这里给出两部分结果,第一部分是全球或半球平均值,第二部分是纬向平均与全球地理分布.

1. 全球与半球平均

表 2 给出五个模式模拟由于大气中二氧化碳浓度增加年平均全球平均地面气温与降水率的变化.从表 2 注意到,二氧化碳增加产生的全球年平均地面气温的变化从 2.8°C 到 5.2°C ,相应降水的变化从 $1 \times \text{CO}_2$ 值的 7.1% 到 15%.取五个模式粗略平均,二氧化碳增加引起地面气温变化为 3.9°C ,降水为 $1 \times \text{CO}_2$ 值的 9.9%.

由于大气中 CO_2 浓度增加,其它与热量循环和水循环有关的变量会有些什么变化?表 3 给出用 OSU 模式模拟的 16 种物理量的年平均全球平均和半球平均的变化.从表 3 中看到,由于大气中二氧化碳浓度增加,(a)各层与地面气温、陆面与海面温度全增暖,其中海面温度增加最小;(b)雪盖与海冰覆盖面积明显减小,尤以北半球雪盖面积减小明显;(c)相应地面反照率与行星反照率略减小;(d)地面蒸发加剧,大气中所含可降水份以及降水率均增加,土壤水份稍减小;(e)对流层低层相对湿度增加,中层减少,总云量略减小.

2. 纬向平均与地理分布的变化

表 2 五个模式模拟的年平均全球平均地面气温与降水率的变化 ($2 \times \text{CO}_2 - 1 \times \text{CO}_2$)¹⁾

模式 / 研究者	ΔT_s ($^\circ\text{C}$)	ΔP $1 \times \text{CO}_2$ 值的百分率 (%)
GFDL Wetherald 和 Manabe (1986)	4.0	8.7
GISS Hansen 等 (1984)	4.2	11.0
NCAR Washington 和 Meehl (1984)	3.5	7.1
OSU Schlesinger 和赵宗慈 (1989)	2.8	7.8
UKMO Wilson 和 Mitchell (1987)	5.2	15.0
五个模式平均值	3.9	9.9

1) 根据文献[12],作者略有增改.

表 3 OSU 模式模拟的 16 个变量年平均全球、半球平均变化 ($2 \times \text{CO}_2 - 1 \times \text{CO}_2$)^[1]

变 量 (单位)	全球 ¹⁾	北半球	南半球
海面温度 ²⁾ (°C)	2.47	2.45	2.49
陆面温度 ³⁾ (°C)	2.80	2.90	2.70
地面气温 (°C)	2.84	2.92	2.76
850hPa 气温 (°C)	2.90	2.97	2.83
400hPa 气温 (°C)	2.80	2.71	2.89
可降水 (cm)	0.44	0.40	0.49
850hPa 相对湿度 (%)	5.65	4.73	6.57
400hPa 相对湿度 (%)	-4.58	-4.02	-5.15
降水率 (mm/d)	0.20	0.16	0.23
地面蒸发率 (mm/d)	0.20	0.19	0.21
土壤水份 ⁴⁾ (cm)	-0.04	0.01	-0.10
海冰面积 (10^6km^2)	-3.12	-3.29	-2.94
雪盖面积 (10^6km^2)	-4.86	-7.02	-2.69
总云量	-0.016	-0.014	-0.018
地面反照率	-0.010	-0.013	-0.007
行星反照率	-0.006	-0.008	-0.004

1) 全球平均值是取南、北半球值的算术平均值。

2) 从 62°S 到 62°N 平均。

3) 不包括水和海冰的平均。

4) 不包括水、海冰和陆冰的平均。

上一节给出由于大气中二氧化碳浓度增加的全球平均变化, 这节给出温度、降水、土壤湿度的纬向平均变化以及各区域变化。

1) 地面气温

图 1 给出由于大气中二氧化碳浓度增加, 五个模式模拟纬向平均温度差值的年内变化。五个模式的模拟共同表明, (a) 两半球与极区增暖明显, 中心值高于 8°C , 而低纬度与赤道区域各月增暖最少, 一般低于 4°C ; (b) 两半球高纬度冬半年增暖大于夏半年。例如北半球高纬度 7 月增暖低于 4°C , 但同一地区 1 月增暖高于 10°C 。

从 12—2 月与 6—8 月五个模式模拟的地面气温差值的地理分布 (图略) 可以进一步看到, 大气中 CO_2 浓度增加, 地面气温在这两个季节变化的地理分布状况。12—2 月五个模式表明在北半球高纬度增暖明显, 例如白令海峡附近增暖 10°C 以上, 注意到我国增暖大致在 $4-6^\circ \text{C}$ 。6—8 月五个模式表明增暖主要在南半球高纬度, 北半球增暖较 12—2 月要小, 其中我国增暖大约 $2-4^\circ \text{C}$ 。

2) 降水率

由于大气中 CO_2 浓度增加, 降水率在全球的变化则是较为复杂的, 有些地区增加, 有些地区减少。

模拟由于大气中 CO_2 浓度增加降水率的纬向平均差值各模式不太一致 (图略)。大部分模式模拟表明, 两半球中、高纬度各月降水率差值为正值, OSU 模拟夏半年出现负值。两半球副热带与低纬度则为正负交替出现的分布, 但其正负值出现的时间差别较大。注意到 10°S 附近各月为正差值, 但 OSU 模式 6—11 月为负值。

12—2 月与 6—8 月五个模式模拟的由于大气中 CO_2 浓度增加降水率地理分布的变

化(图略)较为一致,有:(a)12—2月欧亚大陆与北美大部分地区降水率增多大约 $1\text{mm}/\text{d}$,而东南亚到我国东南部及北美南部与中美地区降水率减少大约 $1\text{mm}/\text{d}$ 。(b)12—2月非洲北部降水率减少大约 $0-1\text{mm}/\text{d}$,其它地区增加 $0-1\text{mm}/\text{d}$ 。(c)12—2

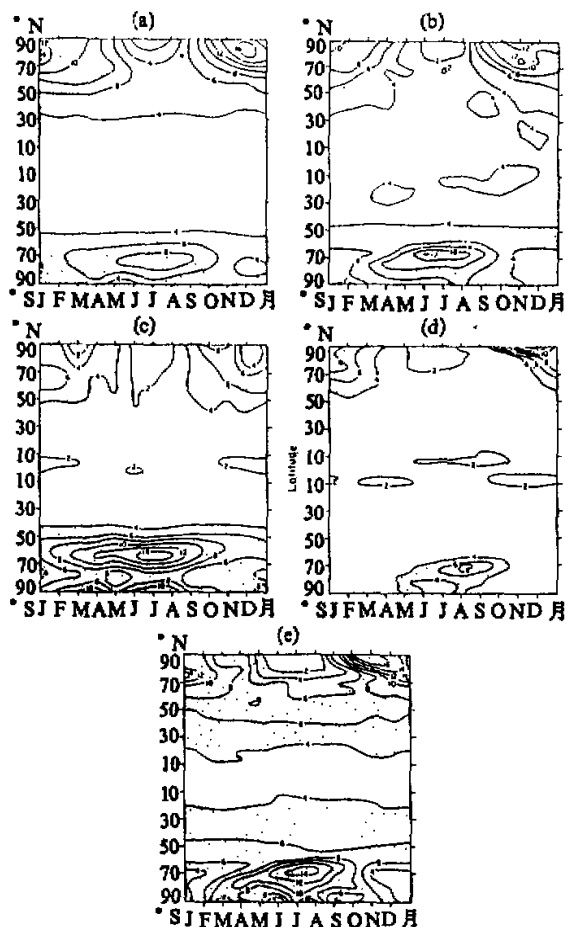


图1 五个模式模拟纬向平均温度差值($2\times\text{CO}_2-1\times\text{CO}_2$,单位: $^{\circ}\text{C}$)

(a)GFDL (b)GISS (c)NCAR (d)OSU (e)UKMO 差值大于 4°C 用点区表示

月几个大洋的热带区域降水率明显增加或减少大约 $2-3\text{mm}/\text{d}$,但五个模式模拟的位置差别较大。(d)6—8月北美中部与南部以及中美地区降水率减少 $1\text{mm}/\text{d}$ 左右。(e)南美与印度半岛大部分模式模拟6—8月降水率明显增加 $2\text{mm}/\text{d}$ 左右。(f)6—8月大部分模式模拟我国降水率增加大约 $1\text{mm}/\text{d}$ 。

3) 土壤湿度

由于大气中 CO_2 浓度增加,全球土壤湿度的变化亦是较复杂的,图2给出五个模式模拟的由于大气中 CO_2 浓度增加纬向平均土壤湿度的差值。从图2可注意到土壤湿度变化的几个特点:(a)北半球高纬度除夏季土壤湿度变干外,其余各季土壤湿度变湿,但 NCAR 模式夏季

亦变湿。(b)北半球中纬度与副热带地区全年各月土壤湿度明显变干,但 NCAR 模式在中纬度全年变湿,副热带冬半年变湿。(c)两半球低纬地区全年或部份月份变湿,但 GFDL 与 UKMO 模式大部份月份变干。(d)南半球中纬度各月或大部分月变干。

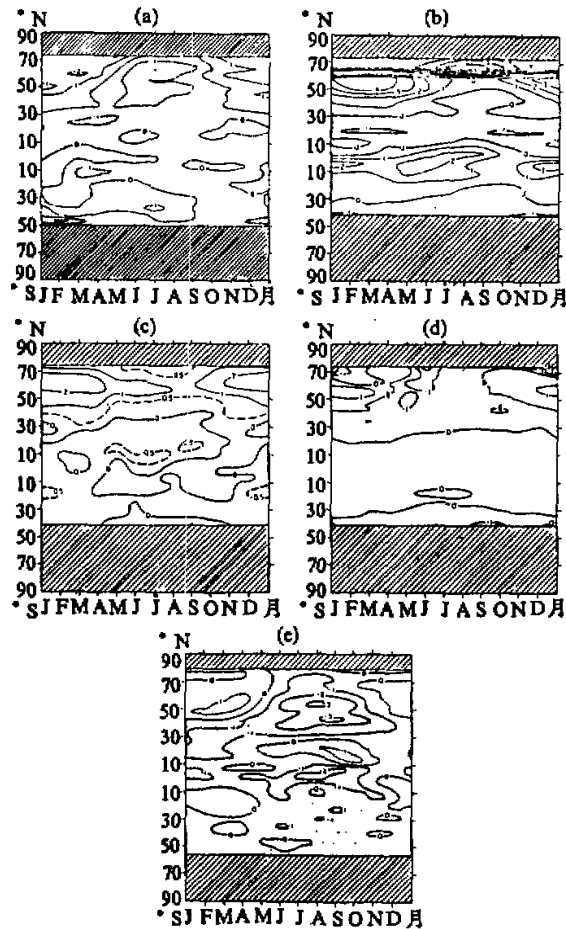


图2 五个模式模拟纬向平均土壤湿度差值(单位: cm)

说明同图1, 负值用阴影区表示。

12—2月与6—8月由于大气中 CO_2 浓度的增加而引起的土壤湿度的变化, 其地理分布(图略)的共同特征有: (a)12—2月欧洲大部分以及苏联欧洲部分土壤变湿, 而南欧变干; (b)12—2月北美北部变湿, 北美南部与中美地区变干; (c)6—8月大部分模式模拟欧亚大陆与北美大部分变干, NCAR 模式除外; (d)6—8月大部分模式表明印度半岛、中印半岛与我国南部西南部变湿, GISS 模式除外。

由于土壤湿度直接影响农业生产, 为进一步表明五个模式模拟几个重要农业区土壤湿度变化, 图3给出综合五个模式对北美地区及亚洲季风区由于大气中 CO_2 浓度增加12—2月与6—8月土壤湿度的变化。从图3明显注意到, 由于大气中 CO_2 浓度增加, 冬季

北美北部土壤湿度变湿,中部与南部变干;夏季北美大部地区变干,尤以中部变干明显,只有西部及南部沿岸地区变湿.在亚洲季风区,冬季其北部包括我国东北及北方大部地区土壤湿度变湿,而印度东北部、孟加拉国、中印半岛及我国南部变干;夏季亚洲季风区北部包括我国东北的北部和西北与河套地区土壤湿度变干,印度半岛、中印半岛的大部分将变湿,而我国东部及东南部地区将略变湿.

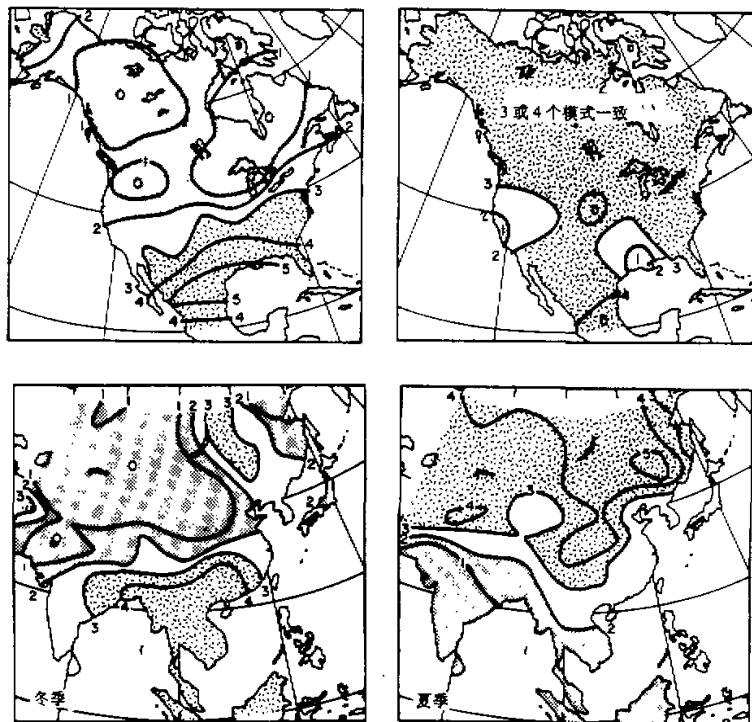


图3 五个模式模拟北美地区和亚洲季风区冬夏土壤湿度变干综合图^[10,14]

上图北美,下图亚洲季风区;左图冬季,右图夏季.花区表示大部分模式模拟变干区.

点区表示大部分模式模拟变湿区.

四、展 望

未来由于人类活动造成大气中 CO_2 浓度将以什么样的速度增长呢?图4给出发达国家与发展中国家采取不同策略使大气中 CO_2 增长达两倍各占的百分数以及发生的时间^[3].其中增长率是根据1976年以来的资料建立的 CO_2 释放指数模式计算的.按照本世纪七十年代从观测资料得到,发达国家燃烧燃料造成大气中 CO_2 增长率是 $0.03/\text{d}$,发展中国家是 $0.07/\text{a}$.从图4可以得到,大约公元2025年大气中 CO_2 浓度即将达到目前的两倍,其中发达国家占58%,发展中国家占42%.若未来燃烧燃料增长率减少,例如发达国家为 $0.01/\text{a}$,发展中国家为 $0.04/\text{a}$,则要到大约公元2052年大气中 CO_2 浓度才达到

目前的两倍, 其中发达国家与发展中国家大致各占 50%。

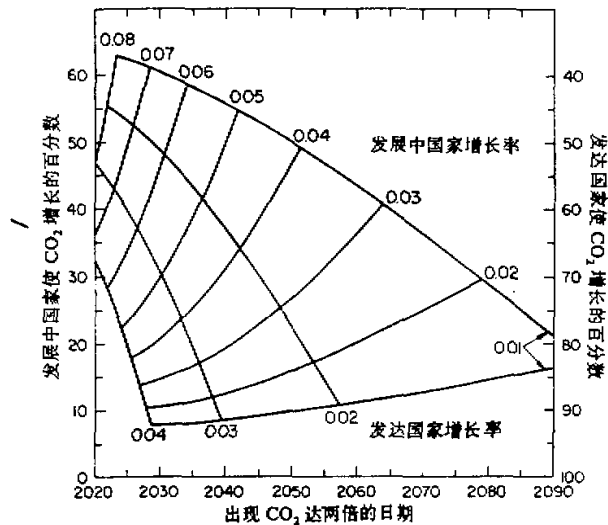


图 4 发达国家与发展中国家使大气中 CO_2 浓度增长两倍所占的百分数^[3]

横坐标为时间 a (年)

由此可见, 对于世界各国未来采取什么样的发展规划, 将直接影响到大气中 CO_2 的含量, 从而影响到全球的气候变化。

未来在大气中 CO_2 浓度增加到目前的两倍, 前面工作已表明, 将明显影响全球气候如气温、降水及土壤湿度等的变化。为给出由于大气中 CO_2 浓度增加, 全球垂直各层次大气海洋温度变化的总轮廓, Schlesinger 等^[15]用 OSU2 层大气环流模式耦合到 6 层海洋(带海冰)模式模拟 16 年大气与海洋的温度变化(图略)。尽管模式远未计算到平衡状态, 但大致看到大气与海洋各层增暖的状况。以第 16 年为例, 大气各层增暖大约 $1.4\text{--}1.6^\circ\text{C}$, 尤以高层增暖明显; 海洋增暖较大气小, 上层增暖较明显, 其混合层增暖大约 1.0°C , 随深度增加增暖减小, 到 150m 增暖大约 0.8°C , 到 500m 深大约只增暖 0.4°C , 而在 1150m 深则几乎没有变化。

在一个暖地球的情况下, 全球土壤湿度的变化给在图 5 中。图 5 上图是根据古气候暖时期大量证据分析的全球可能的土壤湿度分布^[3]。下图为作者用 OSU 全球大气耦合混合层海洋环流(带海冰)模式计算的年内几个季节变湿或变干的频率分布。前者为证据分析, 后者为气候模式模拟, 较一致表明, 在暖地球背景下, 土壤湿度将趋于部分地区变干燥, 如北美大部分——尤以中部明显、东西伯利亚、南非南部以及南美南部; 部分地区变潮湿, 如阿拉斯加、北美南部和中美、南美中部、非洲大部分地区、东亚、东南亚、南亚以及澳洲。图 5 的上下图虽有些地区不一致或相反, 但总的勾画出暖地球条件下土壤湿度的特征。

综上所述, 气候模式模拟工作表明, 由于人类活动造成大气中 CO_2 浓度增加, 有可能使全球大气与海洋变暖, 相应雪盖与海冰将明显融化, 海面将上升, 全球土壤湿度在某些地区将明显变干燥。因而人类活动对气候变化的影响是值得引起多方面重视的。当然, 尚

需指出的是,本文仅给出模式模拟大气中 CO_2 浓度增加可能的气候效应,实际上影响

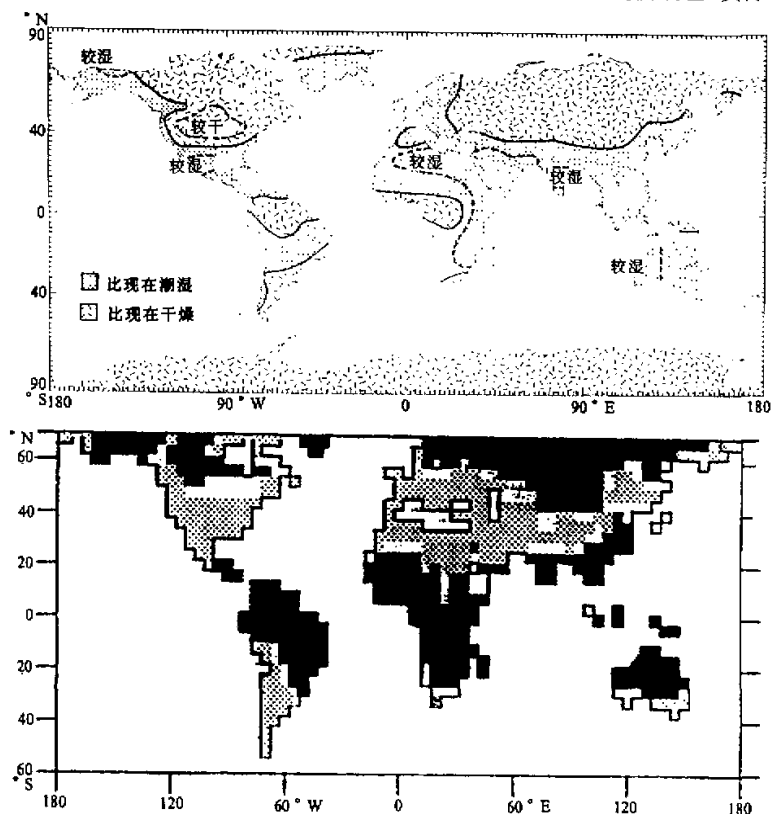


图5 上图为暖地球时期生长季节土壤湿度较现在干或湿的分布^[3];下图为 OSU 大气与混合层海洋模式模拟的全球年土壤湿度频率分布

上图点区为湿区,花区为干区;下图重阴影区为3—4个季节变湿区,轻阴影区为4个季节变干区

气候变化的因子是多方面的,气候变化的原因亦是非常复杂的,有些因子的作用使气候变暖,另一些因子作用则使气候变冷,不同因子对气候干湿影响亦是不一样的.因而在预测未来气候变化时,应该综合考虑多方面因素的联合效应,而不能只孤立看一个因素的作用.另一方面,现在通用的气候模式中一般没有包括化学反应,如海洋对 CO_2 的吸收作用等,同时,目前的气候模式的模拟场还不能完善地模拟出观测场^[8],未来在进一步改进模式的基础上会做出更准确的分析.

感谢:作者由衷地感谢 W.W.Kellogg (NCAR) 与 M.E.Schlesinger (OSU) 给作者提供的大量宝贵材料;作者由衷感谢王绍武(北京大学)对作者完成本文所给予的大力支持,特表深切谢意.

参 考 文 献

- [1] 章基嘉,殷显曦,1987,当代气候变化的趋势及原因分析,气象科技, No.1.

- [2] 王绍武, 1987, 大气中二氧化碳增加对气候的影响, 气候研究进展报告, 中国气候委员会, 66—70.
- [3] Kellogg, W. W. and R. Schwart, 1981, *Climate change and society*, Westview Press, p. 178.
- [4] 赵宗慈, 1986, 用气候模式模拟二氧化碳增加对气候的影响, 气象科技, No. 4.
- [5] Manabe, S., and R. Wetherald, 1987, Large-scale changes of soil wetness induced by an increase in atmospheric carbon dioxide, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 44, 1211—1236.
- [6] Hansen, J., A. Lacis, D. Rind, G. Russell, P. Stone, I. Fung, R. Ruedy and J. Lerner, 1984, Climate sensitivity: Analysis of feedback mechanisms, *Climate Processes and Climate Sensitivity*, Geophys. Monogr. No. 29, J. E. Hansen and T. Takahashi, Eds., Amer. Geophys. Union, 130—163.
- [7] Washington, W. M., and G. A. Meehl, 1984, Seasonal cycle experiment on the climate sensitivity due to a doubling of CO_2 with an atmospheric general circulation model coupled to a simple mixed-layer ocean model, *J. Geophys. Res.*, Vol. 89, 9457—9583.
- [8] Schlesinger, M. E., and Z. -C. Zhao, 1989, Seasonal climate changes induced by doubled CO_2 as simulated by the OSU atmospheric GCM / mixed layer ocean model, *J. Climate*, 2, (in press).
- [9] Wilson, C. A., and J. F. B. Mitchell, 1987, A doubled CO_2 climate sensitivity experiment with a global climate model including a simple ocean, *J. Geophys. Res.*, Vol. 92, 13315—13343.
- [10] Kellogg, W. W., and Zong-ci Zhao, 1988, Sensitivity of soil moisture to doubling of carbon dioxide in climate model experiments. Part I: North America, *J. Climate*, Vol. 1, 348—366.
- [11] 王明星, 曾庆存, 1987, 大气微量成分浓度的变化及其气候效应, 气候研究进展报告, 中国气候委员会, 71—76.
- [12] Schlesinger, M. E., 1988, Model projections of CO_2 -induced climatic change, *Bulletin of the American Meteorological Society*, (in press).
- [13] Schlesinger, M. E., and J. F. B. Mitchell, 1987, Climate model simulations of the equilibrium climatic response to increased carbon dioxide, *Rev. of Geophys.*, Vol. 25, 760—798.
- [14] Kellogg, W. W., and Zong-ci Zhao, 1988, Sensitivity of soil moisture to doubling of carbon dioxide in climate model experiments. Part II: The Asian Monsoon Region, *J. Climate*, Vol. 1, 367—378.
- [15] Schlesinger, M. E., W. L. Gates and Y. -J. Han, 1985, The role of the ocean in CO_2 -induced climate warming: Preliminary results from the OSU coupled atmosphere-ocean GCM, In *Coupled Ocean-Atmosphere Models*, J. C. J. Nihoul, Ed., Elsevier, Amsterdam, 447—478.