

冰 期 气 候 的 数 值 模 拟*

王会军 曾庆存

(中国科学院大气物理所, LASG, 100029)

提 要

应用 CLIMAP 重建的 18000 年以前的地表条件, 作者用大气所两层大气环流模式模拟了冰极盛期 7 月份的气候。结果表明: 全球气温明显低于模拟的现在 7 月份的气温, 降水和总云量减少了, 海平面气压升高了, 而这些变化尤其是气温的变化以北半球高纬陆地区域和南极区为甚; CO_2 含量改变到现代值以后, 引起的气候反响很小, 说明必须用联合模式来研究。作者还指出, 冰期边条件引起的气候反响与 CO_2 含量加倍引起的气候反响有某种一致, 这对我们理解气候系统如何响应外界的强迫是一个启发。

一、引 言

最近的一个冰期大约在 18000 年前达到极盛, 这是气候激烈变化的实例, 这一时期的气候已在海洋和湖泊的沉积物中、在冰原和地表水位的地质学记录中, 以及在土壤和植被记录中找到了较丰富的证据^[1,2]。相对于现在的气候而言, 它的气候是以寒冷、多冰和略干燥为特征的。

CLIMAP(climate, long-range investigation, mapping and prediction) 在大量地收集和研究了古气候样本资料的基础上给出了较为准确和全面的估计^[3,4], 这为模拟工作者带来了很大的方便。

首先用全球大气环流模式模拟冰期气候的是 williams^[5,6](1974), 不过他采用的边条件不是 CLIMAP 提供的。后来, Gates^[7](1976)采用 CLIMAP 的资料用 OSU¹⁾的两层模式^[8]作了模拟, 他们都得到了合理的结果, 初步验证了模式模拟迥异于现在的气候的能力。但是, CLIMAP 1981 年的资料是较 1976 年的更为准确、全面的资料²⁾, 比如海温, 1981 年给出的就比 1976 年给出的高 0.7°C , 这并不是一个小的数字。所以, 后来又有许多学者进行了类似的研究, 例如, Manabe and Hahn^[9]、Manabe and Broccoli^[10]、Broccoli and Manabe^[11]用他们的大气-混合层海洋模式进行了较为详细的研究; Hansen 等^[12]也用他们的大气环流模式进行了模拟; Kutzbach^[13,14]用 NCAR 的模式作了 18000 年以来各时期气候的模拟, 不仅研究了冰期边界条件对气候的影响, 也研究了地球轨道参数和 CO_2 含量的变化对气候的影响, 包括对更长一段时间内季风的影

* 本文于 1990 年 8 月 22 日收到, 1991 年 4 月 3 日收到修改稿。

1) 系俄勒冈州立大学的英文简写。

2) 已有一些人认为这个资料给的海温太高了。

响。不过,问题仍存在不少,模式间的模拟结果有很大不同,不仅表现在变化幅度上也表现在地理分布上;另外,对于不同模式结果的分析会使我们深入认识那时的气候、我们的模式、气候系统变化的一些规律以至对 CLIMAP 资料本身的认识。

我们用大气物理所的两层大气环流模式(IAP AGCM)作了模拟,并且变化 CO_2 含量作了一个试验。首先简要描述一下 IAP AGCM 及冰期边条件和实验设计,然后我们讨论模拟结果。

二、IAP AGCM 的简单描述

这是一个两层全球差分模式,它的动力学框架是在曾庆存和他的合作者们多年研究工作基础上形成的^[15,16,17]。模式中首先引入了一个“标准大气”,然后把对于这个“标准大气”的偏差作为预报量。这个动力系统保持了质量、有效能量的守恒性质,克服了虚假的源和汇的出现。差分方案的精心设计保持了物理系统的固有守恒性。模式物理过程参数化方案是在改动 OSU 模式的基础上形成的。一系列的基础试验证实了该模式具有较好的计算精度。模式较好地模拟了气候平均场,甚至逼真地模拟了东亚季风,初步模拟出了东亚大气环流的季节突变、大气环流的低频振荡和遥相关场型¹⁾。

三、冰期边条件及试验设计

CLIMAP 给出海表温度比现在低约 1.7°C (7 月),在高纬度地区海温比现在低很多,赤道区则低得较少。另外,北大西洋区海温是低得最多的。有必要指出,这里采用的现代 7 月份海温只比 CLIMAP 给出的冰期海温高 1.3°C 。海冰和陆冰的范围较当今大为扩展了,地形高度也因此平均增高了,当然还因为当时的海平面较现在低约 150 m。地表的反照率也大于现在。陆地植被的状况也不同于现在,只不过在本工作中未引入这种变化。

试验中采用了已有的 3 年积分结果中 5 月 31 日的气象场作为初值,下边界条件分别固定在现在和冰期的 7 月份。而地球轨道参数则取现代值,这是因为 18000 年前和现在的轨道参数相差较小的缘故。 CO_2 含量在冰期为 200×10^{-6} ,在现在为 330×10^{-6} ,每个试验积分 75 d,我们取后 30 d 结果的平均作为模拟的 7 月份的气候。

应该说明的是,本工作中不包括季节变化,但有日变化。

除了上述两个试验外,作为对比,我们还将冰期 CO_2 含量由 200×10^{-6} 变为 330×10^{-6} ,其它条件不变,又做了一个试验。

四、模拟结果

1. 冰期气候及与现在气候的差别(7 月份)

1) 梁信忠, IAP GCM 的设计和数值模拟, 大气所博士论文, 1986。

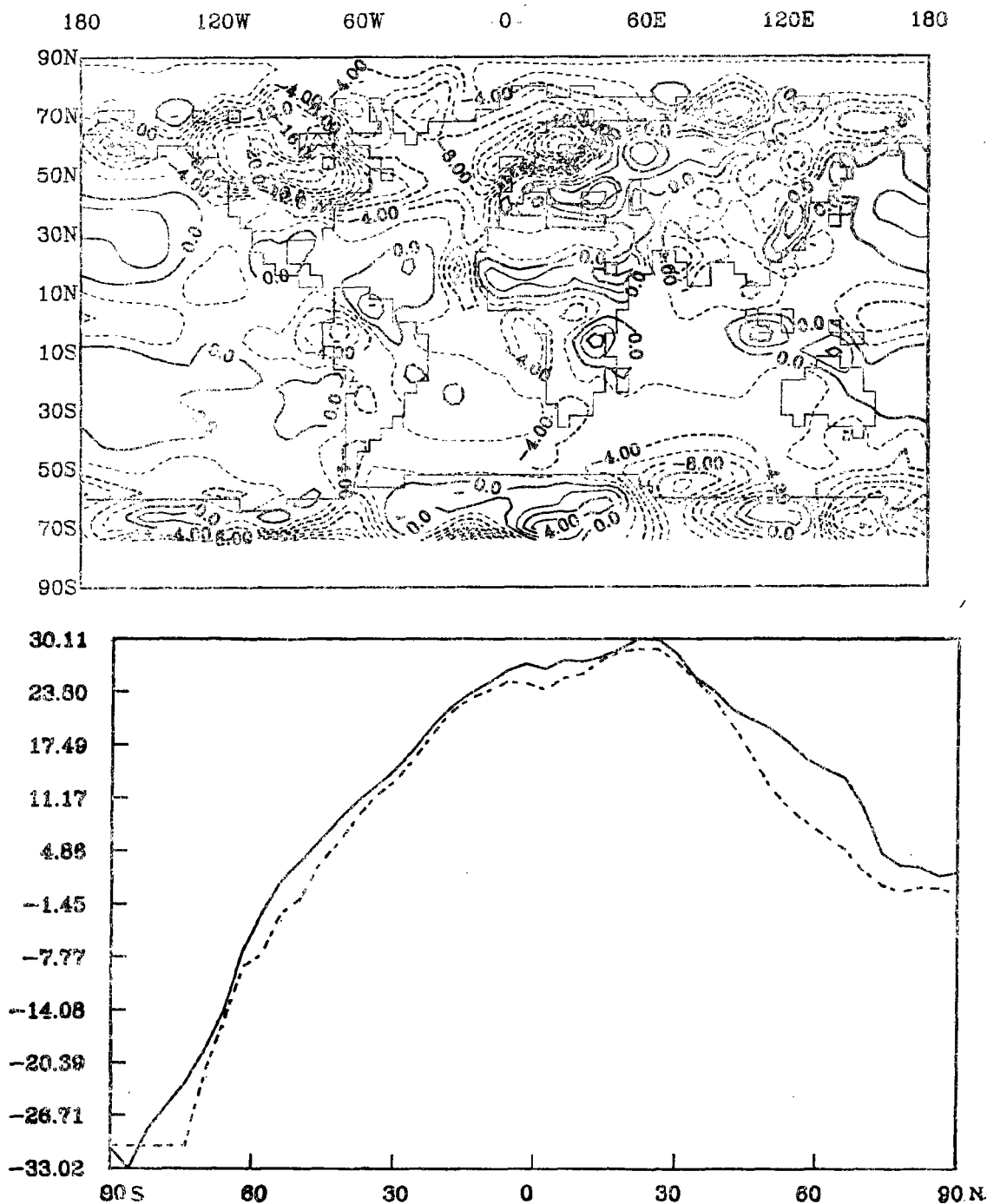


图 1 模拟的 7 月份表面气温
(上 冰期-现在的全球分布, 下 冰期和现在的纬向分布; ——现在,
冰期(下同))

首先, 我们看一下地表气温, 见图 1, 容易看出大部分地区冰期气温明显低于现在。

表 1 模拟的各气象场在不同区域的面积平均值(7月)*

区 域		表面气温(°C)	海平面气压(hPa)	降水率(mm/d)	总云量(%)
全 球	I	14.82	1027.69	2.60	0.50
	M	17.40	1012.40	2.79	0.56
	D	-2.58	+15.29	-7%	-11%
北 半 球	I	20.58	1029.83	3.16	0.41
	M	23.37	1014.80	3.61	0.48
	D	-2.79	+15.03	-12%	-15%
南 半 球	I	9.05	1025.51	2.05	0.60
	M	11.43	1010.03	1.97	0.64
	D	-2.38	+15.48	+4%	-6%
全 球 海 洋	I	14.79	1026.95	2.96	0.61
	M	16.00	1012.55	2.95	0.66
	D	-1.21	+14.40	+0%	-8%
北半球海洋	I	20.94	1031.40	3.75	0.48
	M	21.70	1017.16	4.00	0.58
	D	-0.76	+14.24	-6%	-17%
南半球海洋	I	10.56	1023.89	2.42	0.69
	M	12.09	1009.38	2.22	0.72
	D	-1.53	+14.51	+9%	-4%
全 球 陆 地	I	14.87	1029.04	1.97	0.32
	M	20.20	1011.77	2.31	0.33
	D	-5.33	+17.27	-15%	-3%
北半球陆地	I	20.18	1028.12	2.52	0.33
	M	25.90	1011.28	3.02	0.34
	D	-5.72	+16.84	-17%	-3%
南半球陆地	I	4.33	1030.86	0.87	0.31
	M	8.88	1012.74	0.92	0.32
	D	-4.55	+18.12	-5%	-3%

* I 代表冰期, M 代表现代, D 代表差异; 其中降水量和总云量差是以现代值的百分数给出的, 另外, 差异是指冰期值减去现代值。

在欧亚大陆的西部以及北美和南极区尤为显著, 差别最大可达 -20°C 到 -30°C (指冰期的减去现在的, 下同), 而低纬地区、大洋上差别不大, 这在图 1 上很清楚。值得注意的是在太平洋上赤道南北各有一正差区, 即气温高于现在, 这是与海温场的两块正差区对应的, 至于为什么这两块海温会是这样尚不十分清楚。气温纬向分布的最大特点是北半球高纬区和南极区差别最大, 其它地区小些。另外, 从表 1 看, 全球平均表面气温要比现在低 2.58°C , 其中, 北半球低 2.79°C , 南半球低 2.38°C 。可见, 北半球温度变化要强于南半球。我们也注意到, 海洋上的气温变化明显弱于陆地上的气温变化, 前者为 -1.21°C 后者为 -5.33°C , 而陆地气温变化又显著发生于高纬区和南极区。关于气温场, 我们还可以看一下自由大气的情况, 见图 2, 从 400 hPa 气温的纬向分布可见, 整个北半球冰期与现在差距都很大, 南极区仍然比较显著, 但南半球其它地区则很弱。

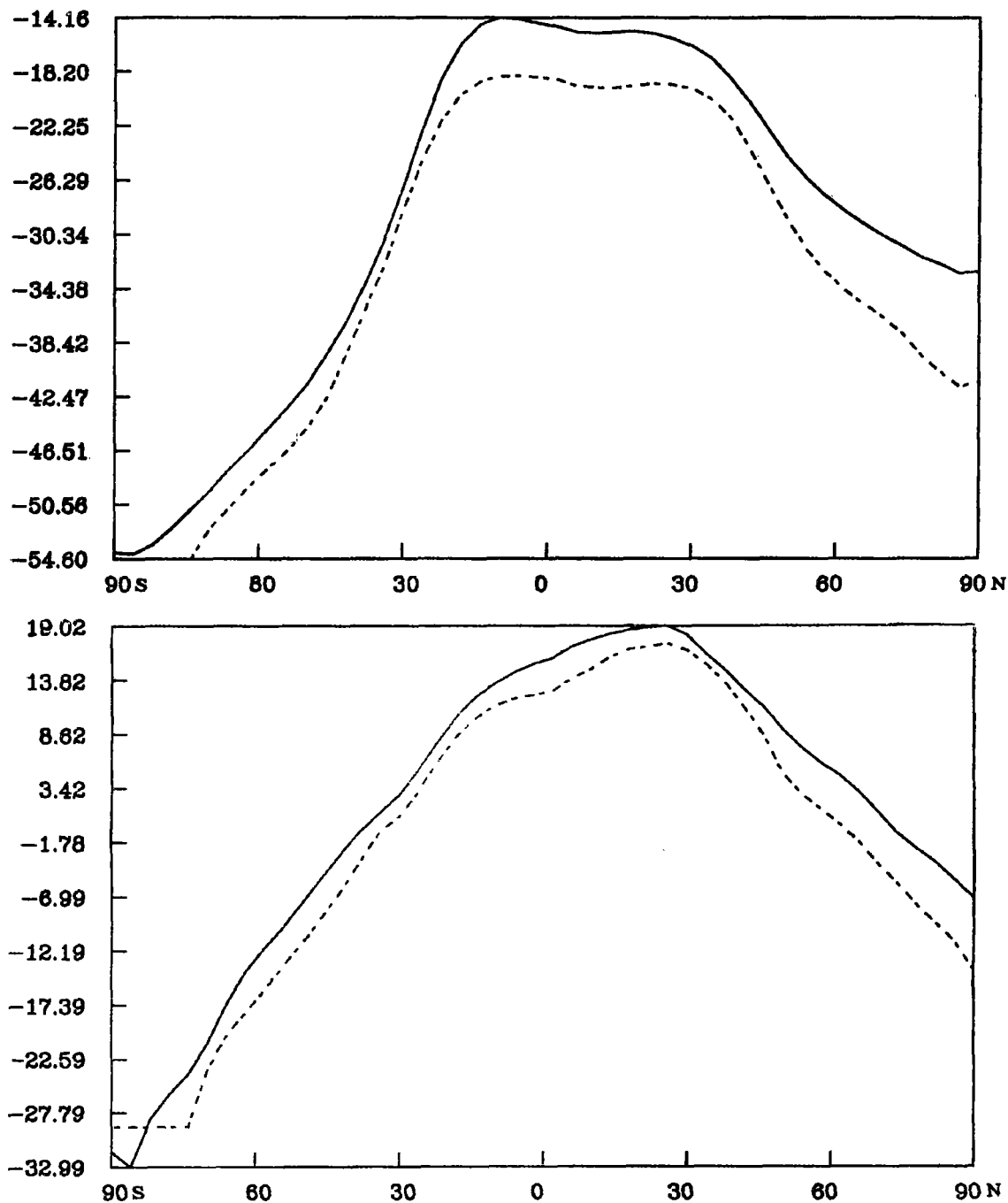


图 2 模拟的 7 月份冰期与现在自由大气温度的纬向分布
(上 400 hPa, 下 800 hPa)

800 hPa 上纬向气温分布的最大特点是各个纬度带上差别都相近, 只是北半球高纬区和南极区略强些。总之, 这一特点在地面和自由大气中均有表现。

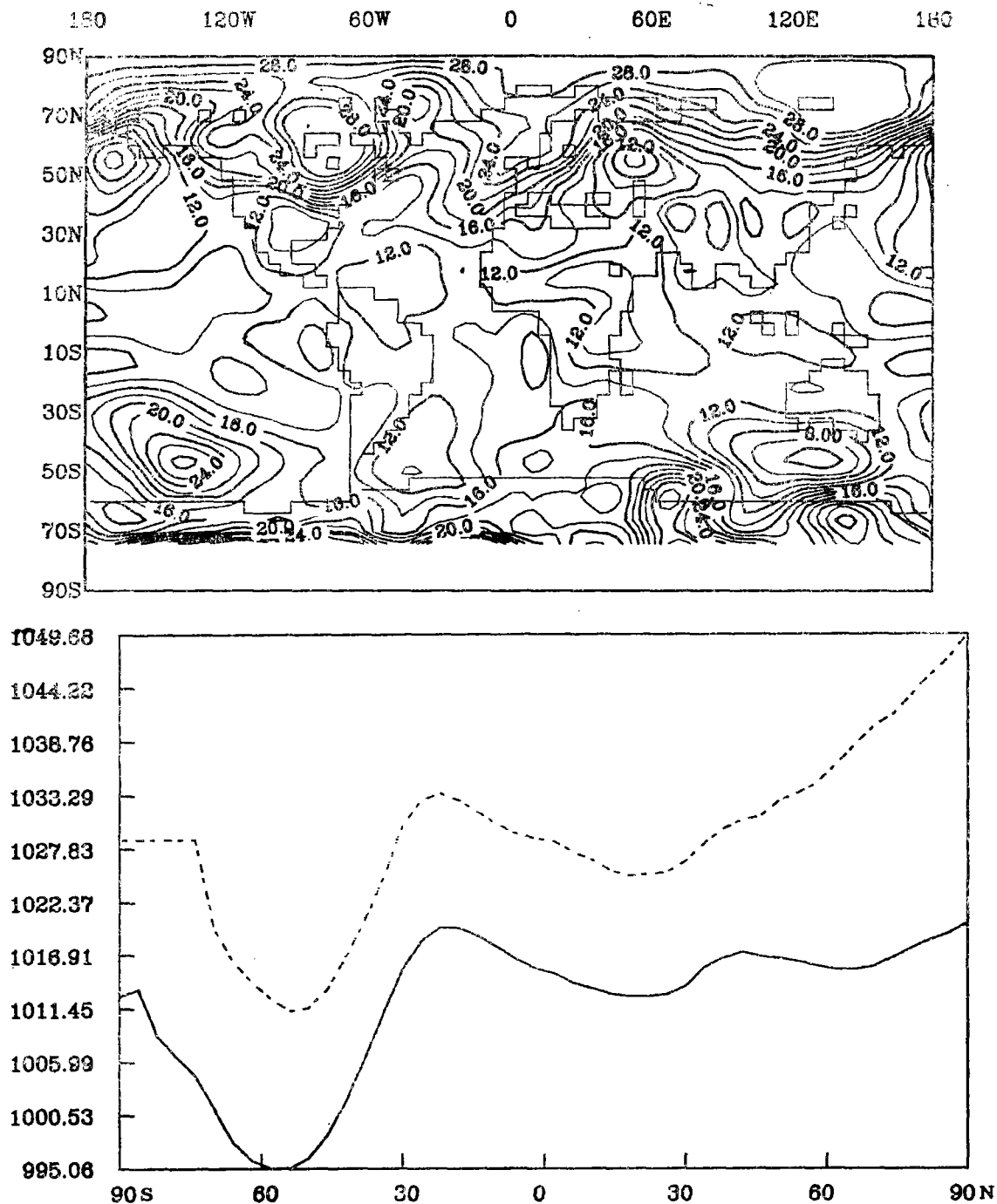


图 3 模拟的 7 月份海平面气压
(上 冰期—现在的全球分布, 下 冰期和现在的纬向分布)

图 3 给出了海平面气压场的情况。在大部分区域, 冰期值高于现在值, 仍是以北半

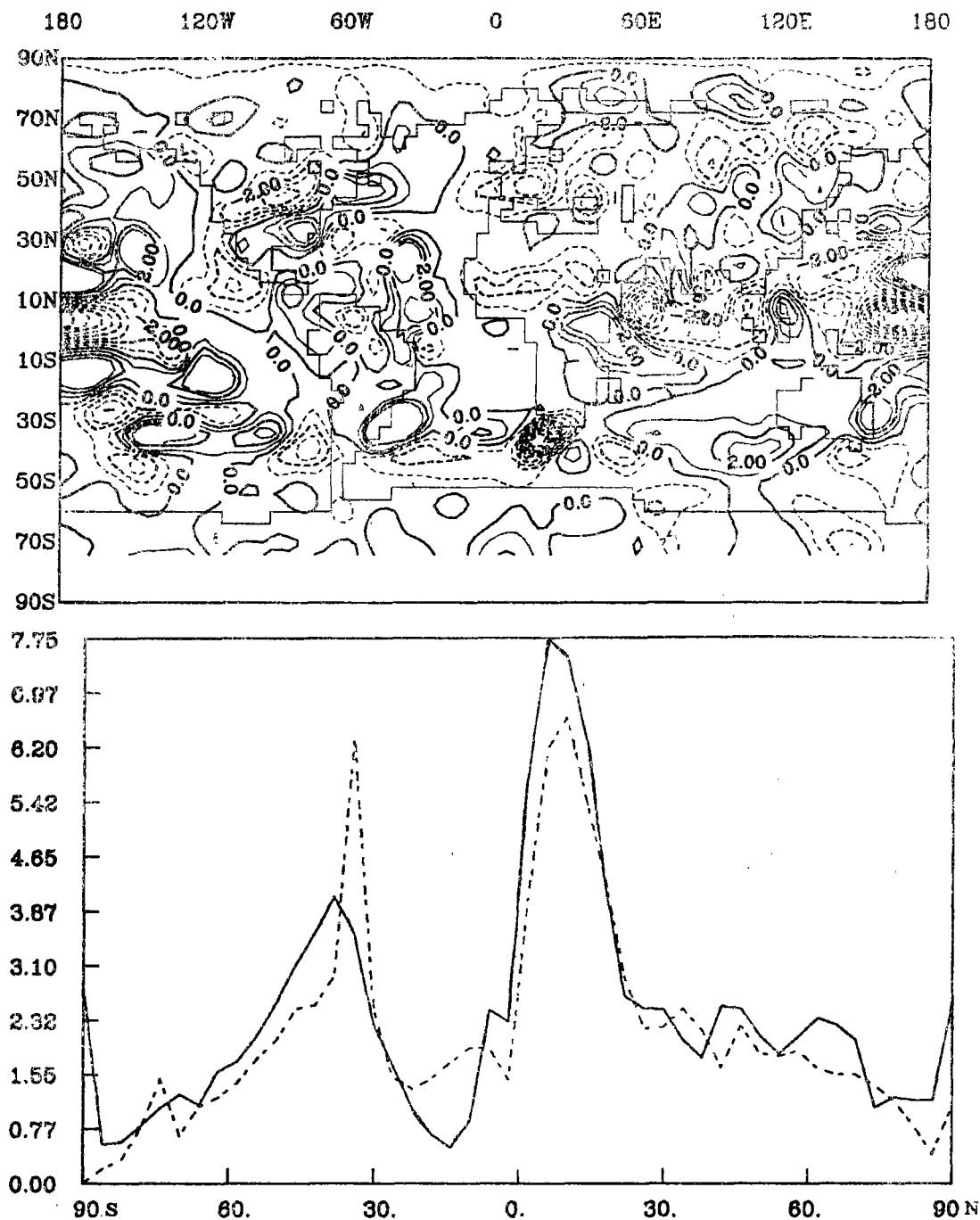


图 4 模拟的 7 月份降水率(mm/d)
(上 冰期—现在的全球分布, 下 冰期和现在的纬向分布)

球高纬区和南极区为甚; 陆地区较海洋区为甚, 分别为 17.27 hPa 和 14.40 hPa (见表 1)。我们注意到冰期和现在的气压场的型式很相近, 例如, 太平洋和北大西洋上的高压系统、青藏高原区的低压系统等等。但也易发现, 整个分布似乎有冰期分布的纬向度加

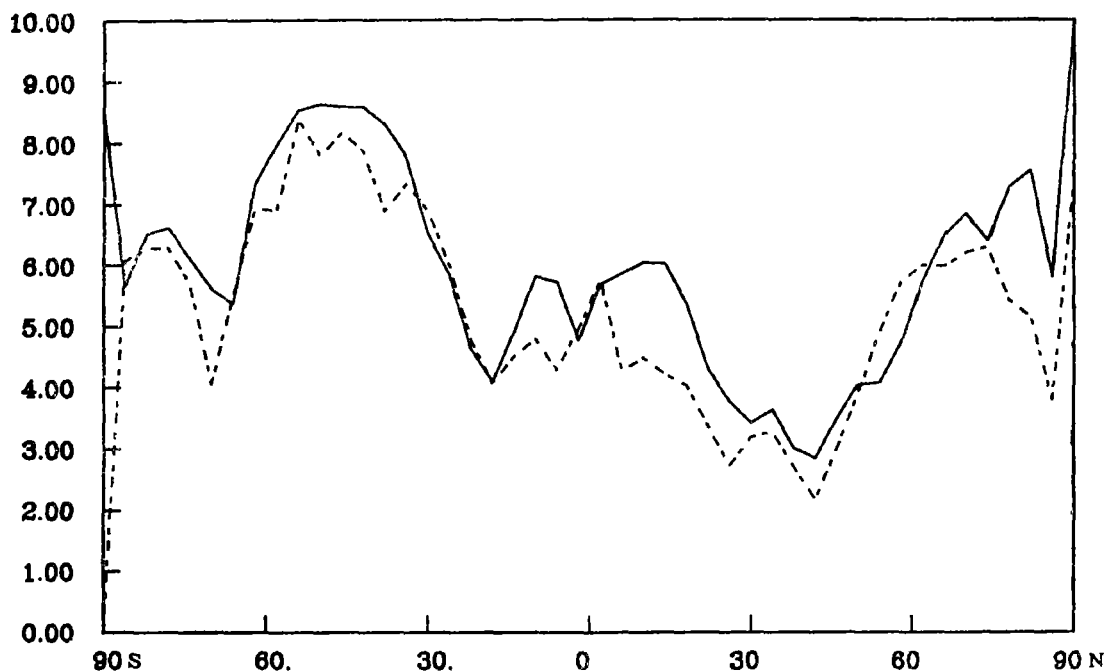


图 5 模拟的 7 月份冰期与现在总云量的纬向分布

强了而经向度减弱了的特点。

下面我们看一下降水的情况。冰期和现在 7 月份降水率最大的区域均在赤道以北的热带。图 4 很清楚地表明冰期 7 月份降水在北半球大部分地区都比现在要少。南半球除了热带区域多于现在而外,其它地区也少于现在。表 1 还告诉我们,全球降水率比现在平均小 0.19 mm/d ,即少 7%,其中,北半球少 12%,而南半球平均还略有增多。冰期总云量在 7 月份也少于现在,在北半球热带区域最为显著,全球总云量减少 11%,其中北半球减少 15%,并且大部分体现在中低纬地区。

水汽含量也少于现在,尤其是热带地区,在各个纬度带上水汽含量均小于现在,陆地区域更显著些。

2. CO_2 的作用

我们将冰期 CO_2 含量由 200×10^{-6} 变成 330×10^{-6} 后,做了一个试验,结果可见表 2,它说明,这个改变对模拟结果影响甚小,如,地表气温平均只增大 0.08°C ,降水只减少

表 2 冰期 CO_2 含量由 200×10^{-6} 变成 330×10^{-6} 后引起的模拟结果的改变

	$\Delta T_s(^{\circ}\text{C})$	$\Delta P_{sL}(\text{hPa})$	$\Delta P_r(\%)$	$\Delta CL(\%)$
全 球	0.08	-0.01	-1	0.0
北 半 球	0.07	0.11	+0.3	2.
南 半 球	0.09	-0.12	-3.4	2.
全球海洋	0.06	-0.66	3	2.
全球陆地	0.11	0.05	5	0.0

1%。但这个结果不能说明 CO_2 含量的变化所起的作用微不足道，只是表明了这样一个事实：必须考虑活动的海洋的作用，必须用大气-海洋耦合模式来研究 CO_2 的作用问题。

五、与其它模拟结果的比较和讨论

多数模拟结果都揭示了冰期气候寒冷、降水少、略干燥的特点，但差别仍明显存在于不同模拟结果中。

表 3. 不同作者模拟结果的比较
(均为面积平均值)

	$\Delta T_s(^{\circ}\text{C})$	$\Delta P_{SL}(\text{hPa})$	$\Delta Pr(\text{mm/d})$	$\Delta CL(\%)$	ΔSST
Gates(1976)	-4.9	+12.7	-0.61	-2.5	-2.3
Manabe et al.(1977)	-5.4				variable*
Manabe et al.(1985)	-4.7				variable
Hansen et al.(1984)	-3.6				variable
Kutzbach(1986)	-3.9		-0.27		-1.7
Wang, Zeng(1989)	-2.6	+15.3	-0.19	-11	-1.3

* variable: 意思是海温是模式预报的,而非作为下边界条件固定的。

表 3 给出了不同作者的结果。本文作者的结果中，冰期气温与现在气温的差别似乎小于其它结果，这是作者引入的海温差别本身就小于其它作者的原因。这些结果说明：地表气温比现在低 3—5 $^{\circ}\text{C}$ ，海平面气压比现在高 10—15 hPa，降水和总云量减少 10%左右。另外，有几点是很有趣的。

(1) 作者的结果显示出北半球变化大于南半球的情况。比如地表气温，南半球冰期和现在的差距是 -2.38 $^{\circ}\text{C}$ ，北半球则为 -2.79 $^{\circ}\text{C}$ ；又比如降水，北半球的差距为 -12%，南半球为 4%。

(2) 作者和其它有些学者如 Manabe 注意到冰期与现在气候的气温差和 CO_2 含量加倍后引起的现在气候的气温变化量级相近。作者还注意到，它们各自的变化都主要反应在高纬陆地区，而降水的变化主要反应在热带区。在冰期试验中，降水在热带减少得最多，在 CO_2 加倍后，降水带将呈现北移的趋势^[19]。

(3) 关于 CO_2 在冰期气候中的作用，作者的试验没能显示出来， CO_2 增加到 330×10^{-6} ，温度只增加 0.08 $^{\circ}\text{C}$ ，Hansen^[12]的结果为 0.2 $^{\circ}\text{C}$ 。这说明在研究 CO_2 问题时需要用海气耦合模式或更加完善的模式。

六、结 论

IAP AGCM 模拟出了寒冷的冰期气候，这一时期降水减少了，云量减少了，海平面气压升高了，空气中水汽含量少于现在。这些结果与其它一些模拟结果相吻合，也与古气候证据基本一致。另外，冰期边条件的引入带来的变化在北半球比在南半球大。

作者模拟的冰期陆表气温只比现在低 2.58°C , 较其它结果要小。这主要是作者引入的海温只比冰期海温高 1.3°C , 而不是 GLIMAP 估计的高 1.7°C 的缘故。

作者注意到冰期边条件引起的气候变化与 CO_2 加倍引起的气候变化有相似的地方, 就是在地理分布上也很相象。这似乎说明气候系统以某种意义上近于相同的方式来反应一些看来并不相同的外界强迫。这个问题是很值得气候学家们进一步研究的。

参 考 文 献

- [1] Flint, R. F., *Glacial and Quaternary Geology*, Wiley, 82pp, 1971.
- [2] West, R. G., *Pleistocene Geology and Biology*, Wiley, 377pp, 1968.
- [3] CLIMAP Project Members, The surface of the ice age earth, *Science*, 191, 1131-1137, 1976.
- [4] CLIMAP Project Members, Seasonal reconstruction of the earth's surface at the last glacial maximum, *Gelo. Soc. Amer. Map Chart Ser. MC-36* 1981.
- [5] Williams, J., and R. G. Barry, Ice age experiments with the NCAR general circulation model: Conditions in the vicinity of the northern continental ice sheet, *Climate of the Arctic*, G. Weller and S. A. Bowling, Eds., University of Alaska press, 143-149, 1975.
- [6] Williams, J., Simulation of the atmospheric circulation using the NCAR global circulation mode with present day and glacial period boundary conditions, Univ. of Colorado, Boulder, 328pp, 1974.
- [7] Gates, W. L., The numerical simulation of ice age climate with a general circulation model, *J. Atmos. Sci.*, 33, 1844-1873, 1976.
- [8] Gates, W. L., The January global climate simulated by a two-level general circulation model: A comparison with the observations, *J. Atmos. Sci.*, 32, 449-477, 1975.
- [9] Manabe, S., and D. G. Hahn, Simulation of the tropical climate of an ice age, *J. Geophys. Res.*, 89, 3889-3911, 1977.
- [10] Manabe, S., and A. J. Broccoli, A comparison of climate model sensitivity with data from the last glacial maximum, *J. Atmos. Sci.*, 42, 2643-2651, 1985.
- [11] Broccoli, A. J., and S. Manabe, The influence of continental ice, atmospheric CO_2 , and land albedo on the climate of the last glacial maximum, *Clim. Dyn.*, 1, 87-99, 1987.
- [12] Hansen, J., A. Lacis, D. Rind, G. Russell, P. Stone, I. Fung, R. Ruedy, and J. Lerner, Climate sensitivity: Analysis of feedback mechanisms, In Hansen J., Takahashi, T., (eds.) *Climate process and climate Aensitivity*, Maurice Ewing Serice, 5, 130-163, 1984.
- [13] Kutzbach, J. E., and P. J. Guetter, The influence of changing orbital parameters and surface boundary conditions on climate: Simulations for the past 18,000 years, *J. Atmos. Sci.*, 43, 1726-1759, 1986.
- [14] Prell, W. L., and J. E. Kutzbach, Monsoon variability over the past 150,000 years, *J. Geophys. Res.*, 92, 8411-8425, 1987.
- [15] 曾庆存, 数值天气预报的数学物理基础, 543 pp, 科学出版社, 1979.
- [16] Zeng, Q. C., C. G. Yuan, X. H. Zhang, X. Z. Liang and N. Bao, A grid point general circulation model, Collecting of papers presented at the WMO/IUGG NMP Symposium, Tokyo, 4-8, August, 1986.
- [17] 曾庆存、袁重光、张学洪、包宁, 一个大气环流差分格式的检验, *气象学报*, 43, 4, 441-450, 1985.
- [18] Manabe, S., and Kirk Bryan, Jr., CO_2 -induced changes in a coupled ocean-atmosphere model and its paleoclimatic implications, *J. Geophys. Res.*, 90, 11689-11707, 1985.
- [19] Washington, W. M., and G. A. Meehl, Climate sensitivity due to increased CO_2 : Experiments with a coupled atmosphere and ocean general circulation model, *Clim. Dyn.*, 4, 1-38, 1989.

THE NUMERICAL SIMULATION OF THE ICE AGE CLIMATE

Wang Huijun Zeng Qingcun

(*LASG, Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica, 100029*)

Abstract

Using the IAP two-level general circulation model, the ice age July climate was simulated through the surface conditions of 18,000 years before present assembled by CLIMAP. Comparing with the present July simulation results, the ice age atmosphere is found to have a substantially lower temperature, precipitation and cloudness, higher sea-level pressure, especially at high latitude land region of Northern Hemisphere and Antarctic. The ice age climate would have been changed little if the CO_2 content is set at modern value, which shows the problem of CO_2 sensitivity should be studied by means of coupled models. It was also pointed out that there are some common characteristics between CO_2 induced climatic changes and the ice age surface condition-induced climatic changes, which may enlighten our understanding of how climate system responds to external forcings.