

9000年前古气候的数值模拟研究

王会军 曾庆存

(LASG, 中国科学院大气物理研究所, 北京, 100080)

提 要

本文用大气物理所的全球大气环流模式模拟了9000年前一月份和七月份的古气候。得出: 北半球夏季由于地球轨道参数的变化引起的比现在多7%的太阳辐射使得温度升高了, 尤其是高纬地区, 海陆对比的加强又增强了季风, 季风区域降水增加了; 而冬季因为太阳辐射在北半球减少了7%, 温度变低了。这些结果与现有的古气候证据相一致, 并与其他模拟结果进行了较详细的比较, 还作了进一步的讨论。

关键词: 地球轨道参数; 数值模拟; 季风。

一、引 言

Milankovitch^[1]曾指出, 地球轨道参数的变化(大致周期: 轨道偏心率—93000年; 黄赤交角—41000年; 岁差—21000年)可以引起冰期—间冰期的变动。从海洋沉积物中得到的过去几百万年的地质学记录中也发现了与这些变化周期相一致的气候变化^[2], 并且, 许多人用简单的气候模式证实了轨道参数的变化与冰期—间冰期气候变化的联系^[3-5]。

地球轨道参数在9000年前与现今是截然不同的。当时, 黄赤交角为 24.24° , 现在为 23.44° ; 近日点出现在北半球的夏季, 而不是象现在这样出现在冬季; 地球公转轨道偏心率那时为0.0193, 而现在为0.0178。这些变化可以导致北半球夏季接收到比现在多7%的入射太阳辐射, 而北半球冬季则比现在少7%。

但是, 大气和海洋对于这种变化的响应是不同的, 热容量大得多的海洋使海表温度的变化要比大气温度的变化小得多, 据Kutzbach^[6]估计, 热带海洋温度变化 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, 而陆表气温变化 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ (冬季变低, 夏季变高)。除了一些海岸地区以外, 9000年前的海面温度与当今的海面温度十分相近。这种海陆的不同响应势必引起海陆对比的加强。另外, 古气候证据还显示出陆地气候在9000年前增大了季节和区域变化^[7]。还由于9000年前是地球最近一个冰极盛(更新世晚期冰期)后的变暖时期, 因此人们对这段时期的气候很感兴趣, 将模拟结果与这一时期的古气候证据相比较, 有利于揭示和验证气候变化的机制, 也更有利于检验模式的有效性。

以往有人用别的模式对此作过模拟^[8, 9], 本文叙述用大气所全球大气环流模式模拟的结果, 同时将此结果与其它结果作了详细的比较和研究, 并提出了一个有趣的现象。

二、模式简介

曾庆存等 1986 年研制出大气所两层大气环流差分模式^[10], 模式引入了“标准大气”的概念, 而把温度、位势高度等相对于这个“标准大气”的偏差量作为预报量, 差分方案可保持质量、有效能量的守恒, 克服了虚假源汇的出现. 模式的参数化方案为 OSUGCM 的改进. 一系列的基础试验证实了这个模式具有较好的计算精度, 气候模拟的结果给出了较好的气候平均场, 甚至逼真地模拟出和东亚季风北进相关联的大气环流季节突变和低频振荡现象以及遥相关场型^[10-12]. 目前这个模式已在气候数值模拟中广泛应用, 关于该模式的详细情况参见文献 [13].

三、试验设计

利用 IAP AGCM 对 9000 前一月份和七月份的气候进行了模拟, 同时也作了当今一月和七月气候的对比模拟试验. 在进行 9000 年前气候模拟时引入了当时的地球轨道参数, 但陆冰、海冰、海温分布均取现代值, 其它条件也不变.

海温、海冰、陆冰的分布分别取一月和七月的平均值, 日 - 地距离分别固定在 1 月 15 日和 7 月 15 日上. 初值取王万秋^[10]的模拟结果中 12 月 31 日和 5 月 31 日的气象场. 积分时间为 90 天, 取后 30 天的平均作为月平均.

四、模拟结果

1. 夏季(七月份)

夏季北半球增大了的太阳辐射导致了表面气温的升高, 尽管, 总的讲, 表面气温的全球分布型式十分相似(见图 1). 全球平均的七月份表面气温在 9000 年前比现在高

表 1 模拟的七月份表面气温和海平面气压在各区域的面积平均值比较

区 域	表 面 气 温 (°C)			海 平 面 气 压 (hPa)		
北半球	23.37	25.49	2.12	1014.80	1013.90	-0.90
南半球	11.43	11.48	0.05	1010.03	1018.42	0.39
北半球陆地	25.90	31.00	5.10	1011.28	1007.71	-3.57
北半球海洋	21.70	21.85	0.15	1017.16	1018.00	0.82
南半球陆地	8.88	8.17	-0.16	1012.74	1013.62	0.88
南半球海洋	12.09	12.14	0.05	1009.38	1009.66	0.28
季风区	31.00	33.11	2.11	1007.30	1004.23	-3.07
全 球	17.40	18.49	1.09	1012.40	1012.20	-0.2
全球海洋	16.00	16.10	0.10	1012.55	1013.06	0.51
全球陆地	20.20	23.52	3.32	1011.77	1009.69	-2.08
	现代	9000 年前	9000 年前 - 现代	现代	9000 年前	9000 年前 - 现代

1) 梁信忠, 1986, IAP GCM 的设计及数值模拟, 大气所博士论文.

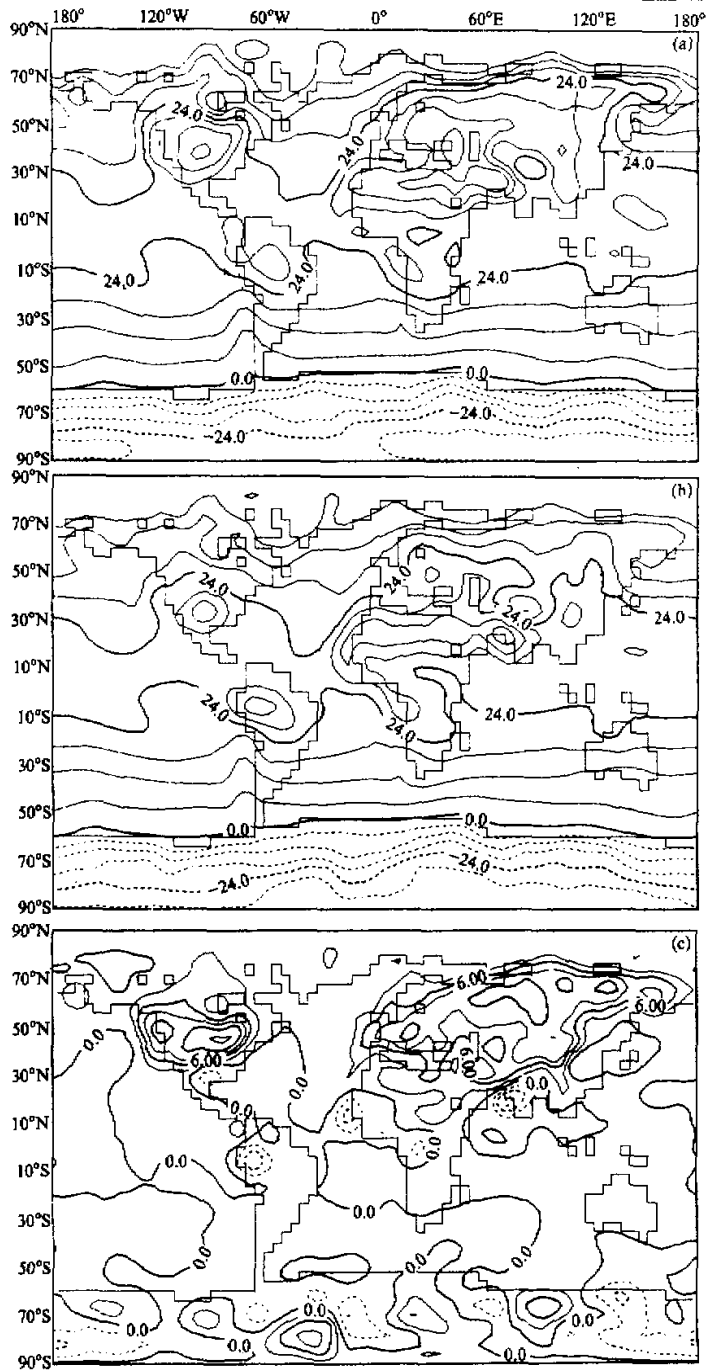


图1 模拟的七月份表面气温的全球分布
(a) 9000 年前; (b) 现在; (c) 9000 年前减去现在.

1.1K, 在欧亚大陆温度变化非常明显, 大部分地区温度增高了 4K 以上(9000 年前减去现在, 下同), 北美增温也很大, 平均北半球增温超过 2K, 达到 2.1K, 北半球陆地平均增温 5.1K, 而海洋区只增温 0.15K. 南半球情形则不同. 平均几乎没变, 陆地表面气温反而降低 0.11K, 详见表 1.

我们注意到, 气温差别在陆地区比在海洋区为大(分别为 3.3K 和 0.1K); 在北半球比在南半球大. 这是因为, 首先, 海洋热容量要比大气大得多, 因而增加的太阳辐射使得大气温度增高较海洋为大; 其次, 北半球陆地所占比例比南半球大这一事实也解释了北半球七月份温度差异(9000 年前 - 现在)较南半球大这个现象.

海平面气压的分布型式也很接近, 当然也存在不小的差别. 北半球陆地区的海平面

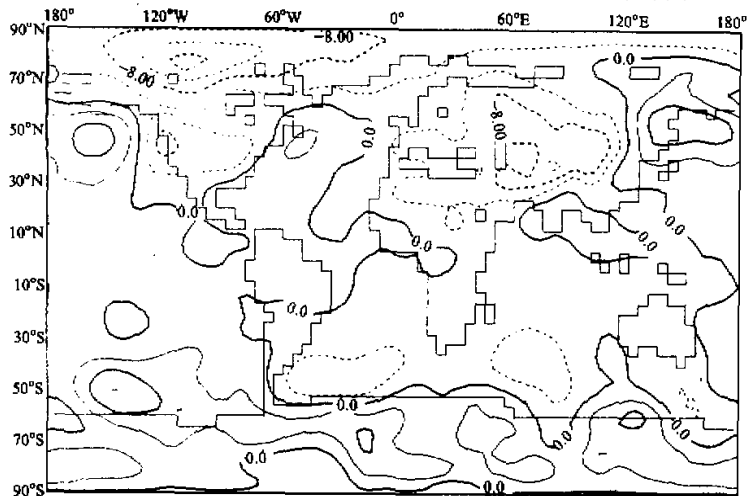


图 2 模拟的七月份海平面气压差的全球分布

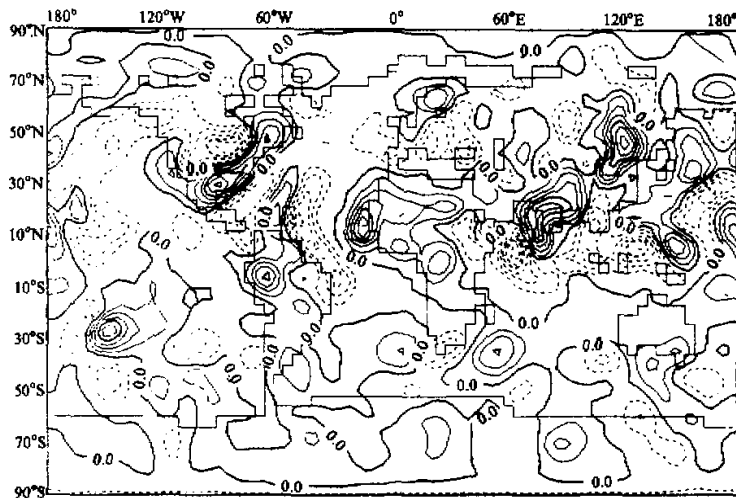


图 3 模拟的七月份降水率之差的全球分布

气压较低, 平均低 3.51 hPa, 在亚洲和格陵兰尤为明显, 而在北太平洋和南半球高纬地区, 海平面气压比现在还高 (见图 2), 北半球海洋区海平面气压平均比现在高 0.84 hPa (见表 1)。表面气温和海平面气压的这种变化意味着海陆对比加强了, 因而势必使北半球夏季季风加强。降水的变化似乎也证实了这一点 (见表 2)。季风区域降水增加了 1.18 mm/d, 即比现在多 34%, 而整个北半球陆地区只增多 15%, 其全球分布如图 3。因而这种季风增强的过程可以概括成如图 4 所示。

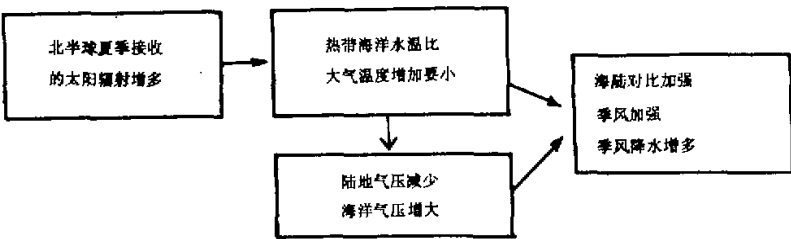


图 4 季风增强的过程示意图

当然, 本工作中海表温度是固定的, 而且模拟中不包含季节变化, 因而实际变化幅度可能没有这么大。

另外, 我们注意到, 北半球平均降水比现在少 2%, 其中, 陆地区是增多的而海洋区是减少的; 而南半球则比现在多 5%, 陆地区和海洋区均为增多。

表 2 模拟的七月份降水率和总云量在各区域的面积平均值比较

区 域	降 水 率 (mm/d)			总 云 量		
北半球	3.61	3.52	-2%	0.48	0.43	-11%
南半球	1.97	2.06	5%	0.64	0.63	-2%
北半球陆地	3.02	3.47	15%	0.34	0.27	-21%
北半球海洋	4.00	3.58	-11%	0.58	0.54	-7%
南半球陆地	0.92	1.20	30%	0.32	0.34	6%
南半球海洋	2.22	2.26	2%	0.72	0.70	-3%
季风区	3.41	4.59	35%	0.26	0.29	12%
全 球	2.79	2.79	0%	0.56	0.53	-5%
全球海洋	2.95	2.80	-5%	0.66	0.63	-5%
全球陆地	2.31	2.71	15%	0.33	0.29	-12%
	现代	9000 年前	9000 年前 - 现在 (%)	现代	9000 年前	9000 年前 - 现代 (%)

2. 冬季(一月份)

与七月份相反, 北半球一月份接收到的太阳辐射量在 9000 年前比现在少, 使得气

温明显低于现在,降低最明显的区域在北美冰原区和白令海峡附近,欧亚大陆温度降低也很显著,大部分地区减少超过 1.5K,而海洋区和低纬区差别很小,北半球海洋区气温降低仅 0.13K,而整个北半球低 0.64K;但南半球平均只低 0.10K.全球平均表面气温比现在低 0.39K,详见表 3 和图 5.

但冬季气压、降水、总云量等的变化则较小,见表 3 和表 4.

有趣的是七月份表面气温在 9000 前和现在相差 1.1K,而一月份只相差 0.39K;另外,南半球七月份温度几乎没变,而北半球七月份则变化 2.1K.呈现了冬、夏季之间

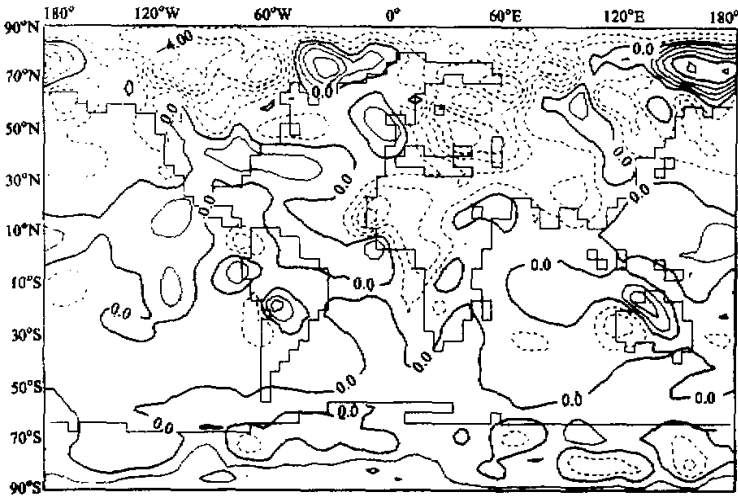


图 5 模拟的一月份表面气温差的全球分布

表 3 模拟的一月份表面气温和海平面气压在各区域的面积平均值比较

区 域	表 面 气 温 (℃)			海 平 面 气 压 (hPa)		
北半球	10.89	10.25	-0.64	1014.80	1014.80	0.00
南半球	17.17	17.06	-0.11	1011.69	1011.85	0.16
北半球陆地	5.13	3.75	-1.98	1017.42	1017.23	-0.19
北半球海洋	14.72	14.58	-0.14	1013.05	1013.12	0.07
南半球陆地	17.79	17.60	-0.19	1010.34	1009.87	-0.47
南半球海洋	17.03	16.93	-0.10	1012.00	1012.31	0.31
季风区	18.22	16.70	-1.52	1018.58	1020.51	1.93
全 球	14.02	13.63	-0.39	1013.24	1013.30	0.06
全球海洋	16.09	15.97	-0.12	1012.43	1012.64	0.21
全球陆地	9.37	8.39	-0.98	1015.05	1014.76	-0.29
	现代	9000 年前	9000 年前 - 现在	现代	9000 年前	9000 年前 - 现在

和两半球间的“不对称性”，后者是因北半球陆地面积所占的比例较南半球大得多而引起；前者则似乎是由黄赤交角和岁差的变化以及北半球大的陆地比例共同造成的。

表 4 模拟的一月份降水率和总云量在各区域的面积平均值比较

区 域	降 水 率 (mm/d)			总 云 量		
北半球	2.38	2.65	11%	0.59	0.59	-0%
南半球	3.10	2.89	-7%	0.59	0.57	-5%
北半球陆地	1.28	1.23	-4%	0.49	0.50	-2%
北半球海洋	3.10	3.59	16%	0.67	0.66	-1%
南半球陆地	3.74	2.92	-22%	0.45	0.41	-9%
南半球海洋	2.95	2.88	-2%	0.67	0.66	-1%
季风区	0.56	0.58	4%	0.20	0.21	5%
全 球	2.75	2.75	0%	0.59	0.58	-2%
全球海洋	3.01	3.17	-5%	0.67	0.66	-1%
全球陆地	2.10	1.80	-14%	0.48	0.47	-2%
	现代	9000 年前	9000 年前 - 现代 (%)	现代	9000 年前	9000 年前 - 现代 (%)

五、与古气候证据和其它模拟结果的比较

图 6 给出了公元前 6500 年(约 8400 年前)一月和七月盛行海平面气压的可能分布^[14]，可以看出，基本形势与我们的模拟结果很相似。七月份大西洋东部靠近海岸带为一高压区，但强度似乎要比模拟结果弱些，北美东部的低压系统和太平洋的低压形势图 6a 与模拟结果也很相似；一月份的形势也吻合得不错，只是在大西洋的中纬度地区模拟结果与图 6b 差别大一些。另外，温度、降水等的变化，模拟的结果也很理想。

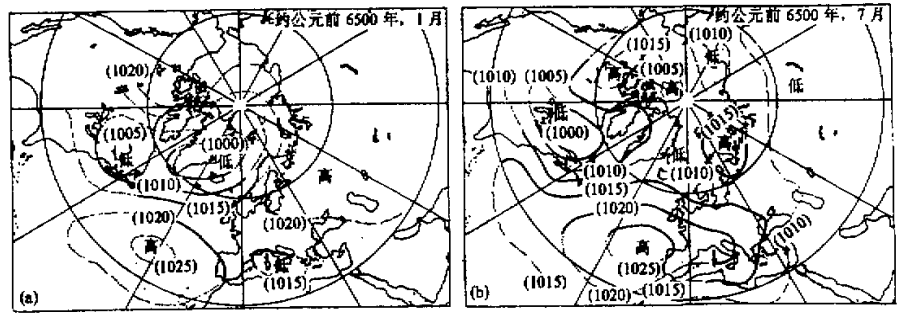


图 6 公元6500 年前盛行海平面气压的可能分布^[14]
(a) 一月； (b) 七月。

这里我们还与 Kutzbach^[8]的结果作了比较，他用的是 NCAR 的大气环流模式。

1. 关于温度差别(9000年前减现在)的两半球间和冬夏季间的“不对称”性

Kutzbach 的结果是, 冬季全球平均表面气温差为 -0.6K , 夏季的为 $+0.5\text{K}$; 作者的结果分别为 -0.39K 和 $+1.1\text{K}$, 这里夏季的差别比他的大, 而冬季的差别则比他的小。另外, Kutzbach 的结果中, 两半球的温度差别没有作者的结果相差得大。

2. 关于 9000 年前和现在温度的差别幅度

对于七月份, 作者得到的北半球陆地表面气温差为 5.1K , 而 Kutzbach 的为 2.0K ; 但对于南半球, Kutzbach 的结果比我们的大。对于一月份, 我们得到的北半球表面气温差远小于 Kutzbach 的。

3. 关于降水变化

对于七月份北半球陆地降水, Kutzbach 的结果是 9000 年前比现在多 20%, 我们的为增大 15%。但对于季风区¹⁾降水的估计, 我们的结果是 9000 年前比现在增多 35%, Kutzbach 的为增多 20%。

所以, 似乎 IAP GCM 模拟出了更强的 9000 年前的季风。

总之, 两个结果是有不少差别的, 但基本情况是一致的: 9000 年前, 夏季北半球比现在暖, 冬季北半球比现在冷, 夏季风加强了, 以季风区域为代表的热带区域降水比现在强了。但作者用 IAP GCM 得到了比 Kutzbach 用 NCAR CCM 更强的夏季季风, 并且, 在 9000 年前与现在的气候量的差别方面, 存在着两个半球和冬夏间的“不对称”性。

可以一提的是, Royer 等 1984 年的工作^[15]也得到了类似的“不对称”性。他们用全球谱模式模拟了 125000 年前和 115000 年前的气候, 发现其差别在北半球高纬区较低纬区为大; 夏季较冬季为大。当然正如作者前面指出的, 后者是与地球轨道参数的变化相联系的。

六、结 论

本工作得到了与古气候证据和其它模拟结果相吻合的 9000 年前的气候, 从而证实了地球轨道参数的变化可引起气候很大的季节、区域乃至全球变化; 也说明了 IAP GCM 在模拟和预测与现在完全不同的气候方面具有潜力。

但是, 不同的模式对于当今气候的一些细节的模拟差别很大, 对一些参数的敏感性也不同, 对古气候的模拟也存在许多差异。模拟古气候并进行各种比较研究对于完善模式、增进对于气候系统的认识是有很大意义的。

参 考 文 献

- [1] Milankovitch, M., 1941, Canon of Insolation and Ice-Age Problem. K. Ser. Akad. Geogr., Spec. Publ. No. 132, 484pp.
- [2] Hays, J.D., J. Imbrie, and N.J. Shackleton, 1976, Variations in Earth's Orbit: Pacemaker of the Ice Ages. *Science*, 194, 1121-1131.

1) 关于季风区的范围, 作者的定义与 Kutzbach 的略有不同。

- [3] Suarez, M.J., and I.M.Held, 1979, Modeling Climatic Response to Orbital Variations, *Nature*, **262**, 46-47.
- [4] Imbrie, J., and K.P.Imbrie, 1980, Modeling the Climatic Response to Orbital Parameter Variations, *Science*, **207**, 943-953.
- [5] Letreut, H., and M.Ghil, 1983, Orbital Forcing, Climatic Interactions and Glacial Cycles, *J. Geophys. Res.*, **88**, 5167-5190.
- [6] Kutzbach, J.E., 1981, Monsoon Climate of the Earth Holocene: Climate Experiment Using the Earth's Orbital Parameters for the 9000 Years Ago, *Science*, **214**, 59-61.
- [7] Kutzbach, J.E., and B.L.Otto-Bliesner, 1982, The Sensitivity of the African-Asian Monsoonal Climate to Orbital Parameter changes for 9000 Years B.P. in a Low Resolution General Circulation Model, *J. Atmos. Sci.*, **39**, 1171-1188.
- [8] Kutzbach, J.E., and P.J.Guetter, 1984, The Sensitivity of Monsoon Climate to Orbital Parameter Changes for 9000 Years B. P.: Experiment With the NCAR General Circulation Model. In "Milankovitch and Climate", Part 2, 801-819.
- [9] Kutzbach, J.E., and R.G.Gallimore, 1988, Sensitivity of a Coupled Atmosphere/Mixed Layer Ocean Model to Changes in Orbital Focusing at 9000 Years B.P., *J. Geophys. Res.*, **93**, 803-821.
- [10] Zeng Q.C., C.G. Yuan, X.H.Zhang, X.Z.Liang, and N. Bao, 1986, A Global Gridpoint General Circulation Model, Collection of Papers Presented at the WMO/IUGG NWP Symposium, Tokyo, 4-8 August.
- [11] Zeng Q.C., Z.Z. Ji, and C.G. Yuan, 1982, Design of Difference Schemes for the Primitive Equation, *Scientia Sinica (Series B)*, XXV, 183-199.
- [12] 曾庆存, 袁重光, 张学洪, 包宁, 1985, 一个大气环流差分格式的检验, *气象学报* **43**(4), 441-450.
- [13] Zeng Q.C., X.H. Zhang, X.Z. Liang, C.G. Yuan, and S.F.Chen, 1989, Documentation of IAP Two-Level Atmospheric General Circulation Model, United States Department of Energy, USA.
- [14] Lamb, H.H., 1987, 气候的过去与展望, 气象出版社, pp225.
- [15] Royer, J.F., M.Degue, and P.Pestiaux, 1984, A Sensitivity Experiment to Astronomical Forcing With a Spectral GCM: Simulation of the Annual Cycle at 125000 Years B.P. and 115000 Years B.P., In "Milankovitch and Climate", Part 2, 733-764.

Numerical Simulation of the Climate 9000 Years ago

Wang Huijun Zeng Qingcun

(LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100080)

Abstract

The January and July climates 9000 years ago was simulated with the IAP AGCM. The seven percent more solar radiation than present absorbed in the Northern Hemisphere summer caused by the orbital parameter changes makes the earth's surface temperature higher, especially in high latitude region. The enhanced land-sea contrasts cause a stronger summer monsoon, and the precipitation in the monsoon region is also reinforced. The Northern Hemisphere winter temperature is lowered by the weaker absorption of solar radiation. These results qualitatively agree with palaeoclimatic evidences. And finally, the careful comparisons with other modeling results and further discussions are made in this paper.

Key words: The earth's orbital parameters; Numerical simulation; Monsoon.