

## 小冰期气候变化主控因子的模拟试验\*

刘 健<sup>1</sup> 陈 星<sup>2</sup> 于 革<sup>1</sup> 王苏民<sup>1</sup>

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008; 2: 南京大学大气科学系, 南京 210093)

**提 要** 小冰期是距今最近, 特征最明显的寒冷气候事件, 对于研究世纪尺度气候变化具有重要意义. 过去的研究结果认为, 太阳活动和火山活动的变化是小冰期气候变化的主要原因. 本文应用 AGCM+SSiB 模式分别试验了植被、太阳辐射和火山活动变化对小冰期温度、降水的影响, 发现下垫面植被变化对小冰期温度变化影响的量级与太阳辐射和火山活动变化的作用相当, 对降水的影响甚至超过太阳活动和火山活动变化的作用, 说明对于世纪尺度的气候变化而言, 下垫面植被的反馈作用不可忽略. 这对于深入理解小冰期气候变化的机理具有启迪作用, 同时也为世纪尺度气候变化研究与气候情景预测提供了新的思路和方法.

**关键词** 小冰期 太阳辐射 火山灰 植被 模拟

**分类号** P467

随着气候变率与可预测性 (CLIVAR) 以及过去全球变化 (PAGES) 高分辨研究的紧密结合, 近年来世纪尺度气候变化研究已成为全球变化研究的热点之一<sup>[1-4]</sup>, 对小冰期 LIA (Little Ice Age) 气候的研究尤其引人注目<sup>[5,6]</sup>. 小冰期 (LIA) 是离现在最近, 特征最明显的气候事件, 曾对社会经济的发展产生严重的影响<sup>[7]</sup>. 关于小冰期气候变化的研究, 在资料和模拟两方面都已有相当多的工作积累. 在资料研究与积累上, 大量集中在对冰芯、树轮、历史文献、湖泊沉积物、珊瑚、石笋等信息载体的高分辨和多环境代用指标的分析上, 提取了大量历史时期气候环境变化信息, 对小冰期气候环境变化特点有了较深入的认识<sup>[8-17]</sup>. 近年来, 随着气候模拟方法和技术的不断完善, 小冰期气候变化的模拟工作取得了明显进展<sup>[18-20]</sup>, 尤其是对小冰期 LIA 以及历史气候变化影响因子作了较多探讨<sup>[21-27]</sup>. 初步结论是, 太阳活动和火山活动的变化是小冰期气候变化的主要影响因子.

但近来作者在研究太阳活动、火山活动、CO<sub>2</sub> 浓度、下垫面植被变化对小冰期气候变化的影响时发现, 下垫面植被变化对小冰期气候变化的影响量级与太阳辐射变化和火山活动变化的作用相当, 对于降水的影响甚至超过太阳和火山活动变化的作用. 这一发现对加深理解小冰期气候变化的机理有着重要意义, 而且为洞察历史时期随着人类活动加强与土地利用的改变, 对自然植被破坏而导致的气候效应, 提供新的思考途径与工具. 下面对这一工作作简要报道.

\* 国家自然科学基金项目 (40272123) 和中国科学院知识创新项目 (KZCX3-SW-321, KZCX2-314-3) 联合资助.  
2003-01-16 收稿; 2003-06-04 收修改稿. 刘健, 女, 1966 年生, 博士, 副研究员. Email: jianliu@niglas.ac.cn

## 1 模式

本模拟试验采用含有陆面过程的全球大气环流模式 AGCM+SSiB<sup>[28]</sup>. 其中 AGCM 是改进的九层 15 波谱模式<sup>[29]</sup>, 水平分辨率相当于  $7.5^{\circ} \times 4.5^{\circ}$ . SSiB 是简化了的生物圈模式<sup>[30]</sup>, 该模式把陆地下垫面分为 1 层植被层和 3 层土壤层, 在植被层中, 又将植被类型分为 12 种 (包括高大植被、低矮植被和农耕植被). 通过 SSiB 运算后输出的 3 层土壤温度与湿度、植物冠层温度与水分存储量、地面温度和地面积雪量等诊断变量, 将 SSiB 与 AGCM 相耦合. 20 世纪 90 年代以来, 我国的气候模拟研究人员对它进行了多方面的改进, 使模式稳定性能加强, 运算速度加快, 模拟的温度、降水、气压和风场等与观测资料更加接近.

作者曾用该模式进行过末次盛冰期、中全新世暖期和现代气候的模拟研究, 取得了较好的结果<sup>[31,32]</sup>, 表明该模式具有较强的古气候模拟能力.

## 2 模拟试验设计

小冰期期间, 太阳辐射比现代平均减少  $0.5\%$ <sup>[33]</sup>, 平流层火山灰光学厚度平均为  $0.15$ <sup>[33]</sup>, 下垫面植被为人类活动影响很弱的天然植被<sup>[34]</sup>. 为此, 本文设计了 3 个模拟试验, 见表 1.

表 1 模拟试验一览  
Tab. 1 Modeling experiments in the study

试验编号	太阳辐射	火山灰光学厚度	下垫面植被类型
1	现代值	不考虑	现代农耕植被
2	现代值	不考虑	工业革命前植被
3	比现代值减少 0.5%	0.15	现代农耕植被

\*参考文献[34]中的图 4.3(a)、(b)分别给出了现代农耕植被和工业革命前植被的植被类型.

模式中的其他参数各试验均相同,  $\text{CO}_2$  浓度、海温、海冰等均采用现代值. 各试验均积分 5 年, 取后 4 年的平均值代表气候平衡态.

## 3 模拟结果

试验 1 为控制试验, 用于检验模式的模拟能力; 试验 2 为植被敏感性试验, 用于测试小冰期下垫面植被类型对气候变化的影响; 试验 3 为太阳辐射和火山灰共同影响的敏感性试验, 用于测试太阳辐射和火山灰变化对小冰期气候的影响. 下面通过对试验 1, 2, 3 的模拟结果的比较, 探讨下垫面植被类型变化、太阳辐射和火山灰变化对小冰期气候变化的影响与贡献.

图 1(a) 和 (b) 分别是试验 2 与控制试验 1 的年平均温度和降水的差值, 图 1(c) 和 (d) 分别是试验 3 与控制试验 1 的年平均温度和降水的差值. 图中阴影表示置信度在 95% 以上的 t-检验显著的区域. 对比图 1(a) 和 (b) 不难看出, 植被改变对温度和降水的影响型式不同. 就温度而言, 植被的影响在  $60^{\circ}\text{N}$  存在一个明显的转折 (图 1(a)), 以北地区温度变化呈带状分布, 降温大多在  $0.2-1.0^{\circ}\text{C}$ , 最大达  $1.4^{\circ}\text{C}$ ; 以南为区域性块状降温区, 降温幅度小于  $0.2^{\circ}\text{C}$ . 受太阳辐射和火山灰共同影响的温度变化 (图 1(c)) 则无此特征,  $60^{\circ}\text{N}$  以北的降温幅度与前者大致相当, 但带状分布不明显, 中纬度地区变幅略高, 达  $0.2-0.4^{\circ}\text{C}$ . 就降水而言, 在工业革命前植被条件下 (图 1(b)), 降水比现在普遍减少, 减少幅度大多在  $0.5\text{mm/d}$ , 减

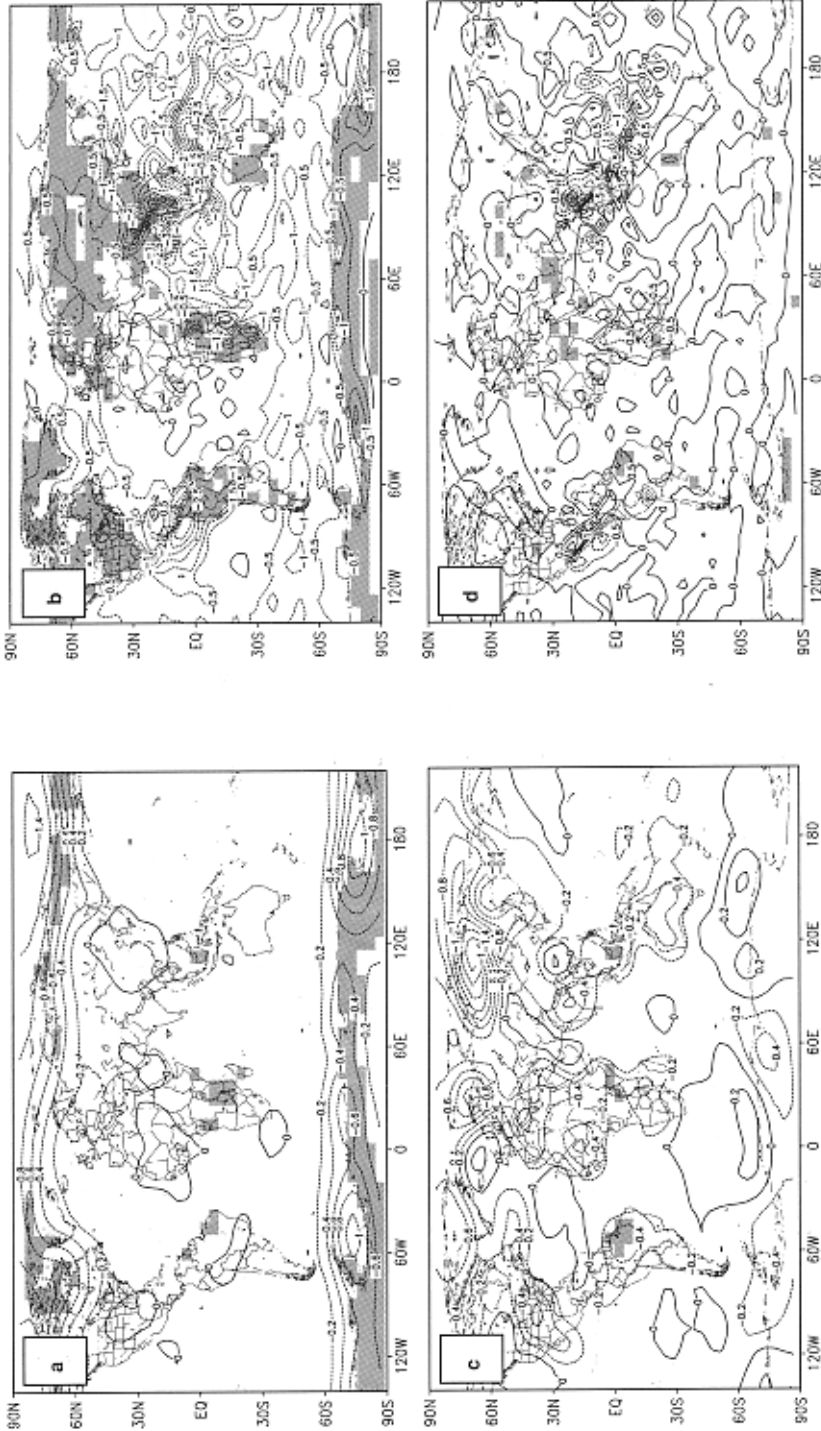


图 1 年平均温度(oC)和降水(mm/d)的差值

- (a) 试验 2 与控制试验的年平均温度(oC)差 ;
- (b) 试验 2 与控制试验的年平均降水(mm/d)差 ;
- (c) 试验 3 与控制试验的年平均温度(oC)差 ;
- (d) 试验 3 与控制试验的年平均降水(mm/d)差 ;

Fig.1 Anomalies of annual temperature (oC) and precipitation (mm/d)

- (a)Anomaly of annual temperature (oC) between Exp.2 and Exp. 1(control test);
- (b) Anomaly of annual precipitation (mm/d) between Exp.2 and Exp. 1(control test);
- (c) Anomaly of annual temperature (oC) between Exp.3 and Exp. 1(control test);
- (d) Anomaly of annual precipitation (mm/d) between Exp.3 and Exp. 1(control test)

少最大的区域出现在中纬度,尤以亚洲季风区为甚,最大达 $-2.0\text{mm/d}$ ;在太阳辐射和火山灰共同作用下(图1(d)),降水的变化格局与植被影响类似,但减少幅度不如植被影响大,最大减少也出现在亚洲季风区,最大减幅为 $-1.0\text{mm/d}$ 左右.

对比图1(a)、(b)和(c)、(d)还可看出,植被改变对温度和降水的影响与太阳辐射和火山灰共同作用的影响量级相同,在部分地区,前者的影响甚至还超过后者.而且植被改变对温度和降水影响的95%显著性区域也要远大于后者.

图2是试验2和试验3与控制试验1的年平均、夏季平均、冬季平均地表温度差值的纬向分布图,其中(a)、(c)、(e)是试验2与控制试验的差值分布,(b)、(d)、(f)是试验3与控制试验的差值分布,(a)、(b)是沿整个纬圈的平均,(c)、(d)是沿经度 $100^{\circ}\text{E}$ - $140^{\circ}\text{E}$ (中国东部)的平均,(e)、(f)是沿经度 $80^{\circ}\text{E}$ - $100^{\circ}\text{E}$ (中国西部)的平均.

比较图2(a)和(b)可以看出,植被变化对纬圈平均温度的影响在 $60^{\circ}\text{S}$ 至 $30^{\circ}\text{N}$ 范围内与太阳辐射和火山灰共同作用的影响大致相近,但在 $60^{\circ}\text{S}$ 以南和 $30^{\circ}\text{N}$ 以北的范围内,植被的效应明显大于后者.比较图2(c)和(e)、(d)和(f)可以看出,植被、太阳辐射和火山灰活动变化对不同经度范围的影响效应在位相和幅度上均有差异,尤其是在 $60^{\circ}\text{S}$ 以南和 $30^{\circ}\text{N}$ 以北的范围内差异显著.太阳辐射和火山灰共同作用下, $30^{\circ}\text{N}$ 以北西部的变化呈峰谷起伏,东部略有起伏,大致呈单谷型;而植被的影响较为规则,呈单谷型.这在一定程度上说明太阳辐射与火山灰的温度效应,受到下垫面的反馈,区域响应的特点更明显.

从图2(a)、(c)、(e)与(b)、(d)、(f)还可看出,植被、太阳辐射和火山活动对气候的影响在南北半球有明显差异,北半球的变化从 $30^{\circ}\text{N}$ 开始明显,而南半球的变化则从 $60^{\circ}\text{S}$ 才开始明显.这是由于南半球的 $30^{\circ}\text{S}$ 至 $60^{\circ}\text{S}$ 以海洋为主,不直接受陆地下垫面植被的影响;而 $30^{\circ}\text{N}$ 至 $60^{\circ}\text{N}$ 则主要为大陆所覆盖,与植被下垫面过程紧密相关.同时还可发现,北半球的变幅与空间变率要比南半球大,这也是植被差异造成的结果.另外,从图2(a)还可看出,工业革命前的自然植被下垫面使北半球中纬度冬季地表气温比现代有所增加,在 $80^{\circ}\text{E}$ 至 $140^{\circ}\text{E}$ 区域(图2(c)、(e))冬温增高明显.这是由于在东亚地区,工业革命前的植被明显优于现代,而裸土范围远小于现代.比较现代植被和工业革命前的植被<sup>[34]</sup>可以发现, $30^{\circ}\text{N}$ 至 $60^{\circ}\text{N}$ , $80^{\circ}\text{E}$ 至 $140^{\circ}\text{E}$ 范围内,由于人类活动加强,阔叶落叶林、针阔混交林被农耕植被取代,草原植被被裸土取代.仅以中国区域计算,现代裸土面积比工业革命前增加了 $2.4\times 10^6\text{km}^2$ (相当于6个网格点),中国东部约 $2.0\times 10^6\text{km}^2$ (相当于5个网格点)的农耕植被取代了工业革命前天然阔叶落叶林、针阔混交林和草被覆盖,导致地表反照率增大而引起地表水热平衡发生变化,从而使气候发生变化.模拟试验不同类型植被的反照率按文献[30]中的参数化方法计算,年平均地表反照率如表2所示.小冰期时较好的自然植被,其气候效应导致模拟的冬季温度略升,这与全新世(6ka BP)时茂密的自然植被导致模拟结果冬季升温是一致的<sup>[35]</sup>.

## 4 结论

本研究应用大气环流模式AGCM+SSiB,分别试验了太阳辐射和火山活动、陆地植被变化对小冰期温度、降水的效应,结果表明:

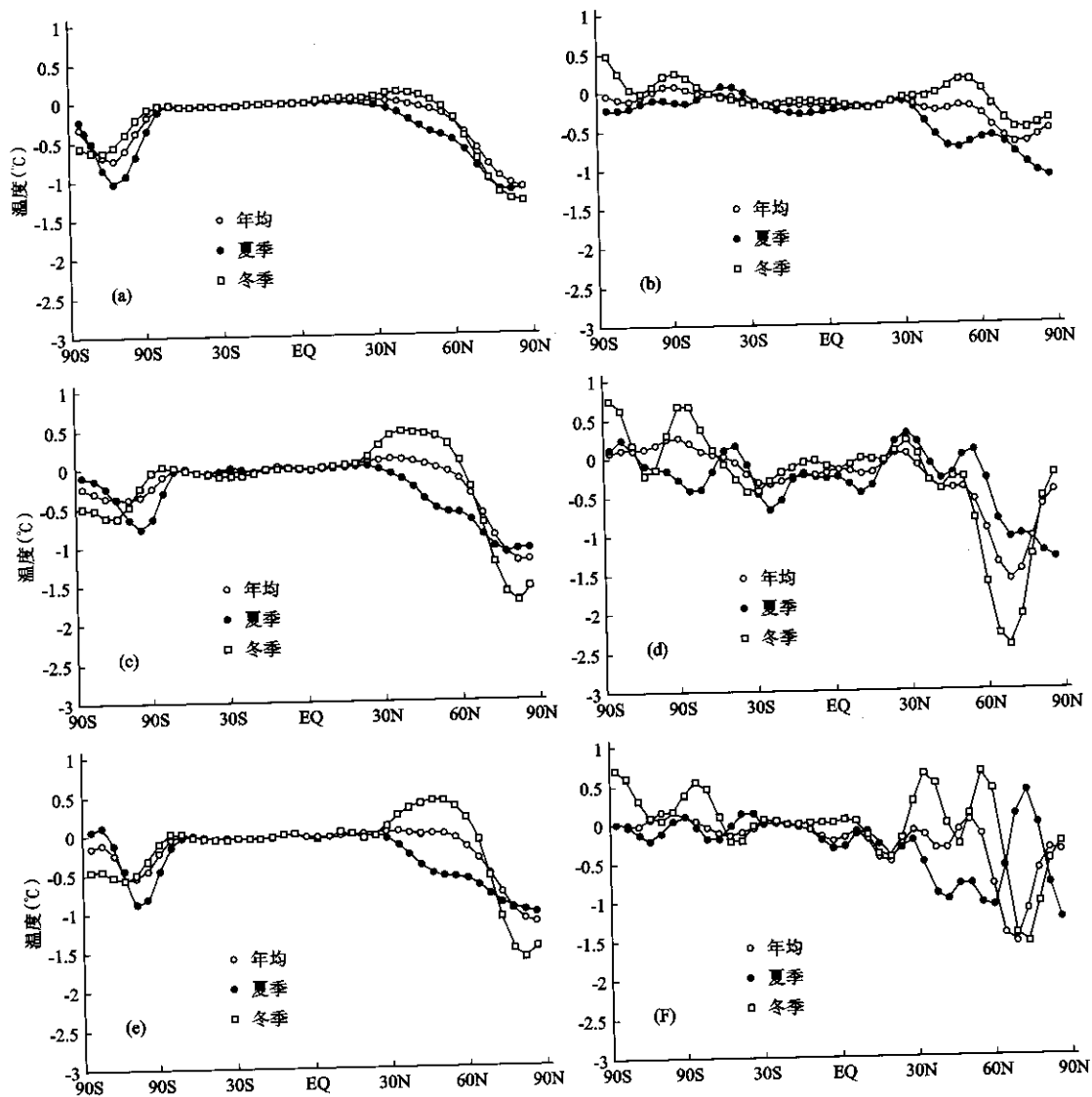


图 2 试验 2 和试验 3 与控制试验的年平均、夏季平均、冬季平均地表温度差值的纬向分布  
 (a) 试验 2 与试验 1 差值的纬圈平均分布; (b) 试验 3 与试验 1 差值的纬圈平均分布; (c) 试验 2 与试验 1 差值沿经度  $100^{\circ}\text{E}$ - $140^{\circ}\text{E}$ (中国东部)平均分布; (d) 试验 3 与试验 1 差值沿经度  $100^{\circ}\text{E}$ - $140^{\circ}\text{E}$ (中国东部)平均分布; (e) 试验 2 与试验 1 差值沿经度  $80^{\circ}\text{E}$ - $100^{\circ}\text{E}$ (中国西部)平均分布; (f) 试验 3 与试验 1 差值沿经度  $80^{\circ}\text{E}$ - $100^{\circ}\text{E}$ (中国西部)平均分布

Fig.2 Latitudinal distribution of annual, summer and winter surface temperature anomalies

(a) Anomaly between Exp.2 and Exp.1,  $0$ - $360^{\circ}\text{E}$ ; (b) Anomaly between Exp.3 and Exp.1,  $0$ - $360^{\circ}\text{E}$ ; (c) Anomaly between Exp.2 and Exp.1,  $100^{\circ}\text{E}$ - $140^{\circ}\text{E}$  (Eastern China); (d) Anomaly between Exp.3 and Exp.1,  $100^{\circ}\text{E}$ - $140^{\circ}\text{E}$  (Eastern China); (e) Anomaly between Exp.2 and Exp.1,  $80^{\circ}\text{E}$ - $100^{\circ}\text{E}$  (Western China); (f) Anomaly between Exp.3 and Exp.1,  $80^{\circ}\text{E}$ - $100^{\circ}\text{E}$  (Western China)

表 2 不同植被类型的年平均地表反照率<sup>[30]</sup>  
Tab.2 Annual surface albedos of various vegetation types

植被类型序号	植被类型	反照率
1	阔叶常绿林	0.15
2	阔叶落叶林	0.17
3	阔叶针叶混交林	0.15
4	针叶常绿林	0.12
5	针叶落叶林	0.15
6	阔叶林与草被覆盖	0.18
7	草被覆盖	0.20
8	阔叶灌木与多年生草被	0.18
9	阔叶灌木与裸土	0.22
10	阔叶灌木与草被覆盖	0.20
11	裸土	0.30
12	冬小麦与阔叶落叶林	0.20

1) 就温度效应而言, 植被的影响纬向分布特点更明显, 并分别在  $60^{\circ}\text{N}$  和  $60^{\circ}\text{S}$  存在一个分界, 即受海陆分布格局控制, 在  $60^{\circ}\text{N}$  还与常绿针叶林被落叶针叶林取代相关. 太阳辐射和火山活动共同影响下, 在高纬地带与植被的作用具有相当的量级, 但在中纬度的空间分布上区域特点更明显一些.

2) 降水效应的空间分布要比温度复杂得多, 总体上看, 植被变化与太阳辐射和火山活动同时变化两者影响格局大致相似, 中低纬地区强于高纬度地区, 陆地强于大洋区. 其中最为突出的是亚洲季风区与东南亚诸岛, 其变幅与空间变率是最大的地区, 这反映了研究我国小冰期气候特点的重要性与复杂性.

3) 通过植被, 太阳辐射与火山活动对纬向年平均和季节平均温度影响的比较研究, 发现在  $30^{\circ}\text{N}$  至  $60^{\circ}\text{S}$  范围内, 两者的影响大致相似. 但是南半球  $60^{\circ}\text{S}$  以南与北半球  $30^{\circ}\text{N}$  以北植被的降温效应明显, 并表现冬季温度略升; 太阳辐射与火山活动对温度的影响表现出纬度地带的波动. 这种差别是由下垫面植被改变导致陆面水热平衡变化引起的. 因此在世纪尺度的气候变化研究时, 必须充分考虑植被的反馈作用.

### 参 考 文 献

- 1 Briffa K R, Osborn T J. Blowing hot and cold. *Science*, 2002, 295: 2227-2228
- 2 Koslowski G et al. Variations in reconstructed ice winter severity in the Western Baltic from 1501 to 1995, and their implications for the North Atlantic Oscillation. *Climatic Change*, 1999, 41: 175-191
- 3 Verschuren D et al. Rainfall and drought in equatorial east Africa during the past 1,100 years. *Nature*, 2000, 403 (6768): 410-414
- 4 Michael EM et al. Northern Hemisphere Temperatures During the Past Millennium: Inferences, Uncertainties, and Limitations. *Geophys Res Lett*, 1999, 26 (6): 759-762
- 5 Bergeron Y et al. Another look at the Little Ice Age. *Bio Science*, 1999, 48 (11): 884
- 6 Schindler DW, Another look at the Little Ice Age – Response. *Bio Science*, 1998, 48 (11): 884-885
- 7 许靖华. 太阳、气候、饥荒与民族大迁移, *中国科学 (D 辑)*, 1998, 28 (4): 366-384
- 8 Fischer H et al. Little ice age clearly recorded in northern Greenland ice cores. *Geophysical Research Letters*,

- 1998, 25(10): 749-1752
- 9 Melissa F et al. Global warming in the context of the Little Ice Age. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(D16): 19057-19070
- 10 王绍武. 公元 1380 年以来我国华北气温序列的重建. *中国科学(B 辑)*, 1990, 20(5): 553-560
- 11 王苏民等. 湖泊沉积——研究历史气候的有效手段: 以青海湖、岱海为例. *科学通报*, 1991, 36(1): 54-56
- 12 张丕远. 中国近 2000 年来气候演变的阶段性. *中国科学(B 辑)*, 1994, 24(9): 998-1008
- 13 姚檀栋. 青藏高原 2ka 来温度与降水变化——古里雅冰芯记录. *中国科学(D 辑)*, 1996, 26(4): 348-353
- 14 罗建育. 台湾高山湖泊沉积记录指示的近 4000 年气候与环境变化. *中国科学(D 辑)*, 1997, 27(4): 366-372
- 15 王绍武. 中国世纪尺度的气候, 第四纪研究, 1998, (1): 54-64
- 16 王绍武. 现代气候学研究进展. 北京: 气象出版社, 2001: 131-138; 423-431
- 17 杨 保. 过去 2ka 气候变化研究进展. *地球科学进展*, 2002, 17(1): 110-117
- 18 Cubasch U et al. Simulation of the influence of solar radiation variations on the global climate with an ocean-atmosphere general circulation model. *Climate Dynamics*, 1997, 13: 757-767
- 19 Manabe S et al. Low-frequency Variability of Surface Air Temperature in a 1000-year Integration of a Coupled Atmosphere-Ocean-Land Surface Model. *Journal of Climate*, 1996, 9(2): 376-393
- 20 Rind D, Lean J, Healy R. Simulated time-dependent climate response to solar radiative forcing since 1600. *J Geophys Res*, 1999, 104(D02): 1973-1990
- 21 Stuiver M et al. Sun, Ocean, climate and atmospheric  $^{14}\text{C}$ : An evaluation of causal and spectral relationships. *The Holocene*, 1993, 3: 289-305
- 22 Briffa K R et al. Influence of volcanic eruptions on Northern Hemisphere summer temperature over the past 600 years. *Nature*, 1998, 393: 450-455
- 23 Mann M E et al. Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries. *Nature*, 1998, 392: 779-787
- 24 Hunt B G. Natural climatic variability as an explanation for historical climatic fluctuations. *Climatic Change*, 1998, 38(2): 133-157
- 25 Bradley R. Enhanced: 1000 years of climate change. *Science*, 2000, 288: 1353-1355
- 26 Crowley T J. Causes of climate change over the past 1000 years. *Science*, 2000, 289: 270-277
- 27 Cubasch U et al. The influence of total solar irradiance on climate. *Space Science Reviews* 2000, 94: 185-198
- 28 Liu H, Wu G X. 1997: Impacts of land surface on climate of July and onset of summer monsoon: A study with an AGCM plus SSiB. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1997, 14: 289-308
- 29 Wu GX, Liu H, Zhao YC et al. A nine-layer atmospheric general circulation model and its performance. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1996, 13(1): 1-18
- 30 Xue Y K, Sellers P J, Kinter J L, Shukla J. A simplified biosphere model for global climate studies. *J Climate*, 1991, 4: 345-364
- 31 Chen X, Yu G, Liu J. An AGCM+SSiB Simulating Changes in Paleomonsoon Climate at 21ka in China. *Acta Meteorologica Sinica*, 2001, 15(3): 333-345
- 32 于 革, 陈 星, 刘 健等. 末次盛冰期东亚气候的模拟和诊断初探. *科学通报*, 2000, 45(20): 2153-2159
- 33 刘 健, 陈 星, 于 革等. 东亚小冰期气候形成中太阳辐射和火山灰作用的敏感性试验. *湖泊科学*, 2002, 14(2): 97-105
- 34 于 革, 薛 滨, 刘 健等. 中国湖泊演变与古气候动力学研究. 北京: 气象出版社, 2001: 108-113
- 35 陈 星, 于 革, 刘 健. 东亚中全新世的气候模拟及其温度变化机制探讨. *中国科学(D 辑)*, 2002, 32(4): 335-345

## Modelling Experiments of the Effects of Climatic Main Factors on the Climate Change of Little Ice Age

LIU Jian<sup>1</sup>, CHEN Xing<sup>2</sup>, YU Ge<sup>1</sup> & WANG Sumin<sup>1</sup>

*(1: Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China;*

*2: Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, P.R.China)*

### Abstract

The Little Ice Age is the latest and the most typical case of cold climate event, which is significant for the research of centennial climate change. The existing results of study show that, solar and volcanic activities are the main reasons for the climate change of Little Ice Age. In this paper, by using an AGCM+SSiB model, modeling experiments are made to understand the effects of the changes of solar radiation, volcanic dust, vegetation to the change of temperature and precipitation of LIA, respectively. The result shows that: the effect on LIA temperature of changing vegetation has the same scale to that of changing solar radiation and volcanic dust, while the effect on LIA precipitation of changing vegetation is greater than that of changing solar radiation and volcanic dust. This means the effect of vegetation feedback can't be neglected for centennial climate change. It is helpful to understand the mechanism of LIA climate change deeply, and it provides a new thought and method for research of centennial climate change and forecast of climatic scenario at the same time.

**Keywords:** Little Ice Age; solar radiation; volcanic dust; vegetation; simulation