

关于末次盛冰期青藏高原大范围冰盖 存在可能性的再研究^{*}

姜大膀 王会军 郎咸梅

(中国科学院大气物理研究所竺可桢—南森国际研究中心, 北京 100029)

(中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体动力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029)

摘 要 通过 4 组数值敏感性试验, 利用 BIOME3 生态模式对末次盛冰期中国大陆植被分布状况进行了数值模拟, 再次研究了该时期青藏高原大范围冰盖存在的可能性问题。结果表明, 末次盛冰期大陆植被发生了大规模的变化, 总体呈退化趋势; 在降温 5℃、降水减少 10%、二氧化碳下降 145×10^{-6} 和地球轨道参数轻微变化的情况下, 青藏高原约 1/2 的地区已经被冰覆盖; 进一步的降温和干燥则会加大高原冰的覆盖面积和大陆其余地区植被的退化。

关键词: 青藏高原; 冰盖; 植被

文章编号 1006-9895 (2004) 01-0001-06 **中图分类号** P461 **文献标识码** A

1 引言

国际古气候模拟比较计划^[1] (Paleoclimate Modelling Intercomparison Project, 简称 PMIP) 对末次盛冰期 (Last Glacial Maximum, 简称 LGM) 气候的已有数值模拟在一定程度上成功再现了该时期全球干、冷气候分布的一些主要特征, 但模拟到的降温幅度在热带较代用资料通常偏弱, 在中国大陆地区亦如此^[2]。模拟结果与代用资料的差距逻辑上可以归结为模式自身的不完备性、PMIP 关于 LGM 时期边界条件描述的欠缺或者是重建古气候资料本身的局限性^[3]。

在 PMIP 标准数值试验的基础上, 科学工作者的探索性研究工作^[2, 4~7]清楚地表明大范围植被变化所引起的降温作用是 PMIP 数值试验遗漏的一个重要因素, 正确的 LGM 时期气候模拟必须包含植被变化所引起的反馈作用。此外, 青藏高原的 LGM 时期环境对正确模拟该时期东亚地区的气候变化情况也显得尤为重要^[2]。

LGM 时期青藏高原的环境问题一直以来颇受科学工作者的关注。王明业等^[8]、Kuhle^[9, 10]和韩同林^[11]的研究均指出青藏高原在冰期是存在冰盖的。刘东生等^[12]近期基于对冰期全球降温幅度的认识, 利用张新时、陈旭东发展的气候植被关系模型——“太极系统”模拟了青藏高原 LGM 时期环境状况, 并创造性地提出了该时期青藏高原有存在大范围冰盖的可能性这一挑战性观点。姜大膀等^[13]通过考虑此冰盖, 利用中国

2002-10-22 收到, 2003-02-13 收到再改稿

^{*} 国家杰出青年基金 40125014、中国科学院知识创新工程重要方向性项目 KZCX2-SW-133 和 KZCX2-108、及中国科学院研究生科学与社会实践创新研究类项目共同资助

科学院大气物理研究所的 9 层大气环流格点模式更好地模拟到了青藏高原 LGM 时期的降温幅度。与此相对，施雅风等^[14]认为，末次盛冰期青藏高原大部分地区处于平衡线高度之下，没有发育大范围冰盖的条件；实际地质资料的详细分析也似乎排除了高原末次盛冰期出现大冰盖的可能性^[15]。这些工作充分体现了 LGM 时期青藏高原环境研究的重要性和复杂性。

基于此，我们利用一个生态模式——BIOME3^[16]进行了关于末次盛冰期中国大陆植被分布状况的理想化数值试验，并将重点放在考察该时期青藏高原的环境问题上。利用不同数值模型而采用相同试验设计所获得的模拟结果之间的对比验证是非常重要的，本研究结果因此也十分需要同其他模式结果乃至重建结果进行相互比较，以确定末次盛冰期高原冰盖的大小。

2 生态模式及试验设计

本研究是利用 BIOME3 生态模式开展的，该模式是由瑞典 Lund 大学和德国 Max Planck 生物地球化学研究所在 BIOME 模式^[17]的基础上共同发展创建的全球生态模式。BIOME3 为一个考虑陆地生态平衡的生物圈模式，其水平分辨率为 0.5°，模式输入量包括地理纬度、土壤质地级别和月平均温度、降水及天空云量覆盖资料。基于中国第四纪孢粉数据库小组的工作^[18]以及我们的理解，表 1 列出了 BIOME3 模式囊括的 18 种原始下垫面类型（英文）及其所对应的中国大陆植被（中文）。需要进一步指出的是，BIOME3 模式通过植被的生态生理学局限域、生长环境和不同植被间的竞争状况来最终决定网格点上的植被生态类型。Haxeltine 和 Prentice^[16]对模式的理论基础进行过非常详细的阐述，并成功地模拟了全球大陆的自然植被分布状况。

表 1 BIOME3 模式中的 18 种下垫面类型

1 寒温带落叶松林 (Boreal deciduous forest/woodland)	10 热带稀疏湿润草原 (Moist savannas)
2 寒温带常绿林 (Boreal evergreen forest/woodland)	11 热带稀疏干旱草原 (Dry savannas)
3 温带混合林 (Temperate/boreal mixed forest)	12 高草原 (Tall grassland)
4 温带针叶林 (Temperate conifer forest)	13 低矮草原 (Short Grassland)
5 暖温、温带阔叶落叶林 (Temperate deciduous forest)	14 旱性灌木 (Xeric woodlands/scrub)
6 亚热带常绿阔叶林 (Temperate broadleaved evergreen forest)	15 旱性灌木丛、草原 (Arid shrubland/steppe)
7 热带季雨林 (Tropical seasonal forest)	16 荒漠 (Desert)
8 热带雨林 (Tropical rain forest)	17 北极、高山苔原 (Arctic/Alpine tundra)
9 热带落叶林 (Tropical deciduous forest)	18 冰、极地荒漠 (Ice/Polar Desert)

Ni 等^[19]曾利用该模式模拟了中国大陆当代的植被分布状况，并通过模拟植被与自然观测植被分布的对比，详细验证了 BIOME3 模式对该区域植被的强模拟能力。此外，Ni^[20]还用它模拟了青藏高原的生态群落分布状况及其对全球气候变化的响应。目前，该模式已经在世界范围内得到广泛应用，并在德国 Max Planck 生物地球化学研究所被不断完善、发展。

刘东生等^[12]在国内外科学工作者关于中国大陆冰期气候变化已有研究成果的基础上，根据冰期气候变化的可能性，对“太极系统”模型设置了几种气候变化条件，分别是现代条件，温度降低 5℃、降水减少 10%，温度下降 7℃、降水下降 30%，以及温

度降低 9℃、降水减少了 50％。基于此，本文共设计了 4 组数值模拟试验，具体的试验设计见表 2。月平均温度、降水和云量覆盖资料为 Leemans 和 Cramer^[21]的研究成果。其中，云量资料在 4 组数值试验中均保持不变。与刘东生等^[12]不同的是，基于冰芯中气体的测量结果^[22]，BIOME3 模式中大气 CO₂ 的体积分数在 LGM 时期取为 200×10^{-6} ；地球轨道参数也根据 Berger^[23]的研究结果调整到了 LGM 时期的值，尽管它引起的人射太阳辐射在不同纬度带上的变化相对不大。

表 2 4 组数值试验气候资料及边界条件的设置方案

试验	温度	降水 /mm d ⁻¹	CO ₂ 体积分数 /×10 ⁻⁶	地球轨道参数		
				偏心率	黄赤交角/ (°)	岁差/ (°)
Exp1	当前	当前	345	0.016724	23.446	102.039
Exp2	当前-5℃	当前×90％	200	0.018994	22.949	114.425
Exp3	当前-7℃	当前×70％	同上	同上	同上	同上
Exp4	当前-9℃	当前×50％	同上	同上	同上	同上

3 结果分析

尽管与 Ni 等^[19]所使用的气候、土壤级别资料来源存在一定程度的不同，但 Exp1 试验结果 [图 1a (见图版)] 与其模拟结果大体一致。通过与目前自然植被分布的进一步相互比较表明，该模式基本捕捉到了现今气候条件下中国大陆的自然植被分布状况，说明该模式具有较强的植被模拟能力，可以用来作为研究中国大陆植被分布状况的工具。

Exp2 的模拟结果 [图 1b (见图版)] 则令人惊讶，在降温 5℃、降水减少 10％、二氧化碳下降 145×10^{-6} 和地球轨道参数轻微变化的情况下，中国大陆植被发生很大程度的变化。其中，中国东部植被类型整体上向南漂移，大陆东北部寒温带常绿林向南扩展，温带混合林、温带针叶林面积大大增加；代之以暖温、温带阔叶落叶林、亚热带常绿阔叶林面积的显著减少。此外，中国西北部荒漠区随着气候的相对恶化而扩张。最重要的模拟结果在于，青藏高原约 1/2 地区的表面已经被冰覆盖，冰的周边地区则为苔原分布。

在试验 Exp3 的条件下，青藏高原被冰所覆盖的面积继续扩大，中国西北部的荒漠区域也有所扩张，而大陆其余地区植被在一定程度上继续退化 [图 1c (见图版)]。

Exp4 试验中的进一步降温和干燥条件加大了植被的变化程度 [图 1d (见图版)]。与 Exp3 相比，青藏高原冰的面积变化相对较小，这很可能是由于降水减少量过大的缘故。然而，中国大陆其余地区的植被却发生了巨大的变化，其中西北部的荒漠面积将进一步扩大，高原西部的苔原扩张；东北地区西部被苔原所覆盖，温带植被已经在此纬度带上消失；东部地区低矮草地、温带植被类型相对扩张，这也是植被对恶劣气候条件的自适应过程的一种体现。

相对于刘东生等^[12]利用“太极系统”的模拟结果，BIOME3 模式在降温 5℃、降水减少 10％的气候条件下就模拟到了青藏高原约 1/2 的地区将被冰所覆盖。需要指出的是，刘东生等^[12]的研究忽略了末次盛冰期二氧化碳体积分数与当前存在较大的不同，

而二氧化碳体积分数无疑是各种植被类型生长的一个非常重要的条件。其体积分数的较大变化必将会对各类植被的生长、分布产生影响。此外, LGM 时期地球轨道参数即便与现在的差别不大, 但它也或多或少地对入射太阳辐射量及其分布造成影响, 进而对植被的分布状况产生一定程度的影响。当然, 这两个因素对植被变化的最终影响程度还有待评价, 然而毋庸置疑的是, BIOME3 模式和“太极系统”在数值敏感性试验中均表明, 在 LGM 时期的条件下, 青藏高原发育了面积广大的冰原。换句话说, 数值模式结果暗示, 青藏高原在末次盛冰期气候、二氧化碳以及地球轨道参数条件下有存在大范围冰盖的可能性。

4 结论与讨论

对青藏高原末次盛冰期环境的定位对于我国古地质、冰川、古气候模拟研究领域都是一项十分重要的课题。此前, 诸多的研究工作已经清楚地表明, 末次盛冰期中国大陆降温幅度显著, 气候较现在干燥, 因此, 在此前提下设置 4 组理想化数值试验方案是有很强的前期工作基础的。目前, 大气环流模式、海洋环流模式、海洋—大气环流耦合模式、生态模式等具有很强的模拟气候与环境变化的能力, 并已成为地球科学领域最重要的研究手段之一。尽管 BIOME3 模式还在不断发展、完善, 但其现在版本已经被证明具有很强的模拟能力, 并已经在全世界得到广泛应用。因此, 本文利用此模式得到的数值敏感性试验结果应是有相当参考价值的。此处值得强调的是, 本研究基于 BIOME3 所得的青藏高原末次盛冰期可能存在大范围冰盖的结论与利用“太极系统”模型^[12]所得的结果基本一致。

LGM 时期全球气候发生了巨大的改变, 大陆植被也必将随之而变化, 这种变化在中国大陆究竟有多大, 它们对于气候的反馈作用如何? 基于冰芯^[24]、湖泊沉积物^[25]、黄土^[26]等替代物, 科学工作者能够在一定程度上获得过去不同时间段上的古气候变化信息, 但它们只是覆盖一定范围的时间序列, 我们无法获得大范围内的连续性信息。此前, 中国第四纪孢粉数据库小组^[27]基于表土孢粉资料, 利用孢粉生物群区化方法, 在模拟中国生物群区、生物群区垂直分异和水平梯度分析方面均取得了理想结果, 此外, 他们还利用此模型进行了中国全新世中期和末次盛冰期生物群区的重建, 并取得了很大的进展^[18]。因此, 十分有必要将生态模式(如 BIOME3)模拟结果与重建植被(如利用孢粉数据)进行对比验证, 使之相互裨益。因为借助于模拟结果与复原单点资料的相互比较, 首先, 我们能够评价数值模式的模拟能力, 如 PMIP 计划对于全新世中期和 LGM 时期气候的数值模拟已经取得了巨大的成功; 其次, 可以揭示在全球哪些区域加强古气候资料复原工作最有利于评估气候模式的效能, 而这些模拟与复原资料存在较大差异的区域将成为古气候资料专家们的兴趣所在。

下一步, 我们将利用此模型开展更加“真实”的数值模拟试验, 即将 PMIP 计划的诸多模式合成结果作为初始场模拟末次盛冰期中国大陆的植被分布状况, 并将其与重建生物群区进行对比分析, 以期对该时期植被分布状况进行更为深入的探讨。

致谢: 德国 Max Planck 生物地球化学研究所 I. C. Prentice 教授提供了 BIOME3 生态模式, Ni Jian

博士对 BIOME3 模式成功运行给予了技术帮助，审稿专家提出了一些宝贵的修改意见，特此致谢！

参 考 文 献

- 1 Joussaume, S., and K. E. Taylor, Status of the Paleoclimate Modeling Intercomparison Project (PMIP), In: Gates, W. L. ed., Proceedings of the First International AMIP Scientific Conference (WCRP Report No. 92), California, Monterey: Geneva, 1995, 425~430.
- 2 Jiang Dabang, Wang Huijun, H. Drange et al., Last Glacial Maximum over China: Sensitivities of climate to paleovegetation and Tibetan ice sheet, *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**(D3), 4102, doi:10.1029/2002JD002167.
- 3 Kutzbach, J., R. Gallimore, P. Harrison et al., Climate and biome simulations for the past 21,000 years, *Quaternary Science Reviews*, 1998, **17**, 473~506.
- 4 Crowley, T. J., and S. K. Baum, Effect of vegetation on an ice-age climate model simulation, *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**, 16463~16480.
- 5 Kubatzki, C., and M. Claussen, Simulation of the global bio-geophysical interactions during the Last Glacial Maximum, *Climate Dynamics*, 1998, **14**, 461~471.
- 6 Levis, S., J. A. Foley, and D. Pollard, CO₂, climate, and vegetation feedbacks at the Last Glacial Maximum, *J. Geophys. Res.*, 1999, **104**, 31191~31198.
- 7 Wyputta, U., and B. J. McAvaney, Influence of vegetation changes during the Last Glacial Maximum using the BMRC atmospheric general circulation model, *Climate Dynamics*, 2001, **17**, 923~932.
- 8 王明业、郑绵平, 西藏高原第四纪冰川遗迹, *地理学报*, 1965, **31** (1), 63~74.
- 9 Kuhle, M., Subtropical mountain and highland-glaciation as ice age triggers and the waning of the glacial periods in the Pleistocene, *GeoJournal*, 1987, **14**, 393~428.
- 10 Kuhle, M., Observation supporting the Pleistocene inland glaciation of High Asia, *GeoJournal*, 1991, **25**, 133~231.
- 11 韩同林, 青藏大冰盖, 北京: 地质出版社, 1991, 109pp.
- 12 刘东生、张新时、熊尚发等, 青藏高原冰期环境与冰期全球降温, 第四纪研究, 1999, (5), 385~396.
- 13 姜大膀、王会军、郎咸梅, 末次盛冰期气候模拟及青藏高原冰盖的可能影响, 第四纪研究, 2002, **22** (4), 323~331.
- 14 施雅风、郑本兴、姚檀栋, 青藏高原末次盛冰期最盛时的冰川与环境, 冰川冻土, 1997, **19** (2), 97~113.
- 15 施雅风, 对青藏高原末次盛冰期降温值、平衡线下降值与模拟结果的讨论, 第四纪研究, 2002, **22** (4), 312~322.
- 16 Haxeltine, A., and I. C. Prentice, BIOME3: An equilibrium terrestrial biosphere model based on ecophysiological constraints, resource availability, and competition among plant functional types, *Global Biogeochemical Cycles*, 1996, **10**(4), 693~709.
- 17 Prentice, I. C., W. Cramer, S. P. Harrison et al., A global biome model based on plant physiology and dominance, soil properties and climate, *Journal of Biogeography*, 1992, **19**, 117~134.
- 18 中国第四纪孢粉数据库小组, 表土孢粉模拟的中国生物群区, *植物学报*, 2001, **43** (2), 201~209.
- 19 Ni Jian, M. T. Sykes, I. C. Prentice et al., Modelling the vegetation of China using the process-based equilibrium terrestrial biosphere model BIOME3, *Global Ecology and Biogeography*, 2000, **9**, 463~479.
- 20 Ni Jian, A simulation of biomes on the Tibetan Plateau and their response to global climate change, *Mountain Research and Development*, 2000, **20**(1), 80~89.
- 21 Leemans, R., and W. P. Cramer, The IIASA climate database for mean monthly values of temperature, precipitation and cloudiness on a global terrestrial grid, IIASA Research Report RR-91-18, 1991, International Institute Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 61pp.
- 22 Barnola, J. M., D. Raynaud, Y. S. Korotkevich et al., Vostok ice core provides 160,000-year record of atmospheric CO₂, *Nature*, 1987, **329**, 408~414.

23 Berger, A. L. , Long-term variations of daily insolation and Quaternary climatic changes, *J. Atmos. Sci.* , 1978, **35**(12), 2362~2367.

24 姚檀栋、Thompson L. G. 、施雅风, 古里雅冰芯中末次间冰期以来气候变化记录研究, 中国科学 (D), 1997, **27** (5), 447~452.

25 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, 196pp.

26 刘东生等, 黄土与环境, 北京: 科学出版社, 1985, 481pp.

27 中国第四纪孢粉数据库小组, 中国中全新世 (6 ka BP) 和末次盛冰期 (18 ka BP) 生物群区的重建, 植物学报, 2000, **42** (11), 1201~1209.

On the Possibility of Ice Sheet over the Tibetan Plateau
at the Last Glacial Maximum

Jiang Dabang, Wang Huijun, and Lang Xianmei

(Nansen-Zhu International Research Centre , Institute of Atmospheric Physics , Chinese Academy
of Sciences , Beijing 100029)
(State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid
Dynamics, Institute of Atmospheric Physics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100029)

Abstract With the boundary conditions for the Last Glacial Maximum (LGM), the process-based equilibrium terrestrial biosphere model BIOME3 is used to simulate the potential paleovegetation distribution over China, and to detect the possibility of large-scale ice sheet over the Tibetan Plateau during the LGM. It turns out that vegetation distribution at the LGM is quite different from that at the present day, when the boreal temperate vegetation shift southward as a consequence of drier-colder climate compared to the present day. Sensitivity numerical experiments performed by BIOME3 also reveal that a large range of continental ice sheet do exist over the Qinghai-Xizang Plateau at the LGM.

Key words: the Tibetan Plateau; ice sheet; vegetation