

Numerical simulation of the influence of changing rotation rate on the general circulation of the Earth's atmosphere

lip@lasg.iap.ac.cn

Xinhua Liu

Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change of the
Ministry of Education, Lanzhou University
Lanzhou, China
liuxh@cma.gov.cn

Xinhua Liu, Qingliang Zhou
National meteorological center
NMC

Beijing, China

liuxh@cma.gov.cn, zhouql@cma.gov.cn

Jianping Li

State Key Laboratory of Numerical Modeling for
Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics,
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of
Sciences
LASG, IAP, CAS
Beijing, China

Yi Yang

Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change of the
Ministry of Education, Lanzhou University
Lanzhou, China
yangyi@lzu.edu.cn

Abstract: By using the second version of the Community Atmosphere Model (CAM2) of NCAR, the general circulations of the Earth's atmosphere were simulated under different rotation rates conditions. The results imply that the intensity of three-cell circulation turn strong when the rotation rate turn slow. Furthermore, under slow rotation rate, for annual mean temperature field, there exist the negative anomalies in the Northern Hemisphere and positive anomalies in the Southern Hemisphere. The region of negative anomaly and that of positive anomaly are divided by 15°S. The annual mean zonal wind field has positive anomaly and negative anomaly when the rotation rate is changed. The positive anomalies and negative anomalies are cross. Compared with summer and autumn, in spring, the changes of geopotential height field, temperature field, meridional wind field in the stratosphere and vertical velocity field are opposite under different rotation rates. Compared with annual mean result, the situation of these three fields is reverse. The westerly in mid-latitude are all strengthened in four seasons under slow rotation rate. The change trends of the zonal wind in two Hemisphere are opposite in spring and autumn. The changes of physical quantities have significant seasonal difference. The change in autumn is the biggest. For monsoon, there are three regions of the linear response - African, Middle East and temperate zone and Frigid Zone.

Keywords: rotation rate; general circulation; monsoon; Numerical simulation

1. 引言

天体光学和现代空间测地学观测证实, 地球旋转速率存在从几小时到地质年代的多时间尺度变化^{1,2}。根据古生物化石分析¹, 地球自转速度是越来越慢的。影响地球旋转的因素很多, 如, 大气圈、水圈、地球内部流体核等³。大气与地球自转关系密切, 大气的运动状况影响着地球

自转的情况^{4,5}。而地球自转的变化反过来又会对大气施加影响。

针对百年以下时间尺度地球自转速率变化, 应用实测数据结合动力学方法, 郑大伟⁶(1994)、钱维宏⁷(1995)等较详细地研究了地球自转速率变化对大气和海洋的影响。认为地转速率的变化与南方涛动、厄尔尼诺、副高强度 and 位置、海温以及降水等关系密切。这些分析加深了我们对百年以下尺度地转速率与大气、海洋关系的认识。

对于地质年代尺度的地转速率变化而言, 在古气候学中有两个比较成熟的理论, 第一个是古气候学中的天文理论即米兰柯维奇理论。这个理论认为第四纪冰期和间冰期反复交替(以 10 万年为周期)是地球轨道三要素(地转倾角、偏心率 and 岁差运动)微小变化的结果。第二个理论是大旋回学说。认为地球历史上大冰期和非冰期的反复交替(周期为上亿年)是地转倾角呈现大波动的结果。可见地球轨道地质年代尺度的变化对气候变化影响的重要性。

Hunt⁸(1979 年)将地转速度扩大 5 倍或缩小到原来的 1/5, 模拟出慢地转速度下会出现中纬度西风急流增强, 对流层温度梯度减小, 极区增暖和副热带干旱区扩大等现象; 而快地转速度则对应于一个显著的对流层纬向温度梯度, 并伴随一个干而冷的高纬带区域。但他用的是一个半球模式, 不含地形特征, 不考虑日变化, 云、臭氧、地面反射率等都是用的年平均。由于地形和海陆分布的不同, 科氏力参数改变后所导致的大气环流异常和气候异常对于南北两半球不是对称的。因而 Hunt 未能模拟出环流和气候在南北半球的变化以及两半球之间的差异, 也不能考虑各种影响的月、季之间的区别。Kutzbach 和 Otto-Bliesner⁹(1982 年)分析了全新世(距今约 9000 年)轨道参数变化对亚非季风气候的影响。着重分析了冬夏季风

Supported jointly by the Foundation of Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change of the Ministry of Education in Lanzhou University (the Fundamental Research Funds for the Central Universities Programs for Science and Technology Development of China, 223-860011) and National Department Public Benefit Research Foundation (No. GYHY200806003).

(获得兰州大学半干旱气候变化教育部重点实验室开放基金(兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金, 项目编号: 223-860011)和公益性行业(气象)科研专项项目(GYHY200806003)联合资助。)

气候对不同轨道参数的响应。四季大气环流对不同地转参数的响应没有详细讨论。Kutzbach 和 Guetter¹⁰ (1986) 虽然也讨论了不同轨道参数和地表边界条件对气候的影响。但是主要是将辐射和海温强迫条件分别固定在 1 月和 7 月。而对季节循环情况下不同参数对气候的影响仍然没有详细讨论。Jenkins 在 1993 年用美国国家大气研究中心 (NCAR) 公用气候模式版本 0 (CCM0), 研究了快地转速度对大气环流的影响¹¹。没有考虑地形的影响, 辐射强迫减小当今量的 10% 作为地球初期辐射情况的近似; CO₂ 比目前大气中的含量高; 其他强迫都使用的是年平均的情况。Jenkins 等¹² 在 1993 年使用相同的模式研究了有无陆地以及快地转对 25-40 亿年前气候的影响。Jenkins 在 1996 年用 NCAR 的 CCM1 研究了快地转速度对气候的影响¹³。试验使用了现在的陆地分布情况、CO₂ 和臭氧浓度。但海温场和辐射强迫场固定为冬季一月份气候平均场。Hall 等 (2005) 用过去 165000 年来的轨道强迫海气耦合模式研究了北半球冬季气候对地球轨道参数变化的响应¹⁴。

地质时期尺度地转参数变化对大气环流及气候影响的模拟研究工作大大加深了我们对古气候的认识, 但以往的模拟研究不是针对特定地质时期进行研究, 就是针对特定季节 (多为冬夏季) 进行模拟。从来没有详细给出过地转参数变化对大气环流季节变化影响的研究结果。另外, Jenkins (1996) 认为 18 小时日长是大气环流在快地转条件下发生显著变化的阈值。从 Del Genio (1996) 对慢转行星超旋转的模拟¹⁵ 也可以看到, 日长由 16 倍地球日长增加到 64 倍地球日长过程中, 对流层经圈环流由两圈变成了单圈。那么日长在增减一小时条件下, 大气环流场会发生什么变化呢, 变化是否显著呢? 再者, 大地形条件下不同地转速度对大气环流以及全球季风有什么样的影响呢? 基于以上三点考虑, 本文对不同地转速度下的年平均气候态大气环流场及全球季风进行了模拟研究。

II. 试验设计

本文所使用的模式为 NCAR 大气环流模式 CAM2。详细情况请参见 CAM2 介绍手册 (Collins 等, 2003)¹⁶。CAM2 水平方向采用以球谐函数为基函数的 42 波截断。为了便于物理计算将结果写在纬向 64 个高斯格点、经向 128 个格点的网格点上。垂直为 26 层。垂直坐标为混合坐标。本模式包括详细的辐射、积云对流、陆面过程等参数化方案。海温强迫采用目前 12 个月的气候态平均的海温场。模式中的地形为当前的地形条件。为了考察不同地转速度对大气环流场的影响, 除了给出控制试验外, 本文又给出了日长分别为 23 小时和 25 小时的敏感性试验。分别对应于 $\Omega_1 = 6.9813 \times 10^{-5} s^{-1}$, $\Omega_1 = 7.5884 \times 10^{-5} s^{-1}$ 。以此代表地质史上的地转速度和若干万年以后的地转速度。

由日长为 23 小时和日长为 25 小时对流层 (地表-100 hPa) 和平流层 (100-平流层顶) 整层平均的无量纲角动量以及单位质量大气动能的整层积分随时间的演化可见, 三个量都很快达到了稳定状态。这里的无量纲角动量表征的是大气旋转的指数, 定义为 $a \cos \phi (u + a \Omega \cos \phi)$ 和

$2a^2 \Omega / 3$ 之比 (Hourdin 等, 1995)¹⁷。我们一共运行了 32 年模拟。将前两年作为调整阶段去掉。用后三十年的结果进行分析讨论。

III. 不同地转速度下大气环流模拟结果

A. 年平均气候态的模拟

如果我们将 200 hPa 与 850 hPa 风速差值作为表征三圈环流强弱的指标^{18, 19}, 则随着日长增加, 三圈环流强度变化随着半球与纬度的不同而不同, 而三圈环流的范围变化不明显。从图 1 可见, 全球范围内快转与慢地转条件下的三圈环流与控制试验相比变化趋势基本相反。表现为慢地转条件下北半球三圈环流强度增强的特征。快地转条件下呈现反向变化趋势。这里需要特别指出的是南纬 80° 以南的高纬环流的变化以及 10°S - 10°N 与前面的结论不一致, 表现为慢地转条件下环流强度减弱, 而快地转条件下环流强度与控制试验相比有所增强。总体来讲还是以慢地转条件下全球范围的环流增强为主要特征, 快地转的情况与此相反。

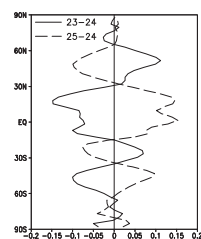


图 1 敏感性试验上层年平均气候态经向风速差减去控制试验上层年平均气候态经向风速差。实线为日长 23 小时与控制试验的差, 虚线为日长 25 小时与控制试验的差。单位: $m s^{-1}$ 。

对于位势高度场有如下结论 (图略): 北半球位势高度在慢地转条件下为负异常, 南半球为正异常。快地转条件下情形相反; 南北半球的反向变化大致以 15°S 为界。

温度场对地转变化有如下响应 (如图 2): 北半球温度在慢地转条件下以负异常为主, 南半球以正异常为主。快地转条件下情形相反; 快地转与慢地转条件下温度场变化的大小不相等; 南北半球的反向变化大致以 15°S 为界。

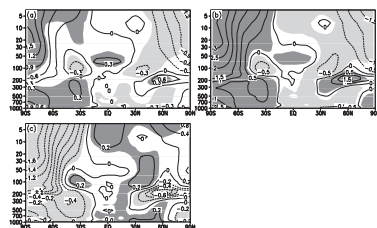


图 2 敏感性试验与控制试验年平均气候态温度场差值纬向平均垂直剖面图。(a) 日长 25 小时减去日长 24 小时; (b) 同 (a) 这里为日长 25 小时减去日长 23 小时; (c) 同 (a) 这里为日长 23 小时减去日长 24 小时。单位: gpm 。图中阴影区为超过 95% 信度检验的区域。黑色阴影表示正异常, 灰色阴影表示负异常。单位: K 。

地转速度发生变化时, 纬向风场发生了正负相间的异常变化。慢地转条件下 40°S-60°S 和 40°N-60°N 两个带状区域西风增强; 0°-20°S 带状区域东风减弱; 其他带状区

域西风减弱。快地转条件下情形与慢地转情形相反，且相反情形发生的纬度稍有南北位移。慢地转条件下两半球中高纬西风加强。15°S-30°S 以及 700 hPa 以下 0°-30°N 上空对于控制试验西风减弱东风增强。15°S-0°S 以及 15°S-60°S，500 hPa 以上西风增强东风减弱。快地转条件下情形与慢地转条件的情形相反。随着地转速度变慢的幅度加大，正负异常区范围也有所增加。在慢地转条件下，原有对流层风场的辐合、辐散都得到了增强；而在快地转条件下，原有对流层风场的辐合、辐散都减弱了（图略）。慢地转条件下，对流层垂直速度整体增强，平流层 30°S 以北垂直速度增强，30°S 以南垂直速度减弱。快地转条件下情形相反，这种反向变化不是完全对称的（图略）。

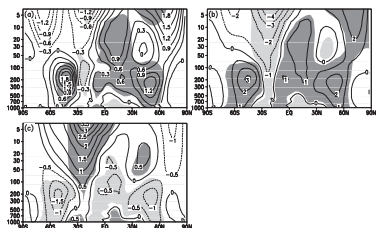


图 3 同图 2，这里为年平均气候态纬向平均纬向风场垂直剖面。单位： m s^{-1} 。

B. 季节平均气候态的模拟

• 由图 4 可见，不同地转速度条件下季节平均气候态三圈环流的变化表现为如下几个特征：

不同地转条件下南北半球三圈环流变化的不一致。北半球三圈环流随不同地转速度的变化比较一致，均为慢地转条件下增强，快地转条件下减弱；而南半球冬季慢地转条件下的增强不明显；秋季南半球低纬度（0°—25°S）Hadley 环流上升支和高纬度（60°S—90°S）反 Hadley 环流与其他纬度和季节不一致，即在慢地转条件下为减弱，快地转条件下为增强；不同地转条件下三圈环流强度变化的季节差异。秋季三圈环流的变化比其他季节的变化都明显。对于 Hadley 环流而言，冬季强度变化次之。不同地转速度下年平均气候态三圈环流的变化以受秋季三圈环流变化影响为主。

位势高度年平均气候态的结果主要受秋季变化的影响，即不同地转条件下秋季位势高度的变化最强变化范围最广。不同地转条件下位势高度的变化表现出强的季节差异。秋季温度场对地转速度的变化最显著，对年平均气候态异常场的分布起到了决定性的作用。春季温度场的变化与夏秋两个季节的变化相反。温度场表现出了很强的季节差异。慢地转条件下中纬度西风加强的现象在四季表现的都很明显，两半球纬向风的变化趋势基本反向。慢地转和快地转条件下纬向风的变化趋势是反向的。秋季的变化最为明显。不同地转条件下四季对流层经向风的异常和三圈环流的变化是一致的，而春季平流层经向风的变化与夏秋两个季节以及年平均气候态的结果反向的。年平均气候态的结果很大程度上受秋季变化的影响较大。对流层垂直运动增强和减弱区与三圈环流的变化基本一致

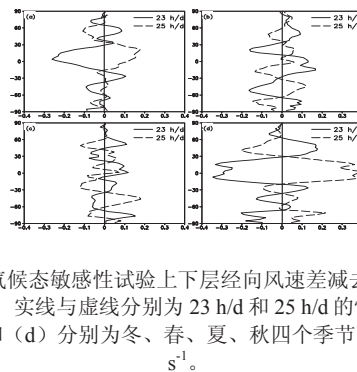


图 4 季节平均气候态敏感性试验上下层经向风速差减去控制试验上下层经向风速差。实线与虚线分别为 23 h/d 和 25 h/d 的情形。（a）、（b）、（c）和（d）分别为冬、春、夏、秋四个季节的情形。单位： m s^{-1} 。

C. 不同地转速度对全球季风系统的影响

我们使用李建平和曾庆存^{20, 21}定义的标准化风场季节变率和动态标准化变率指数来研究季风系统对地转速度变化的响应。

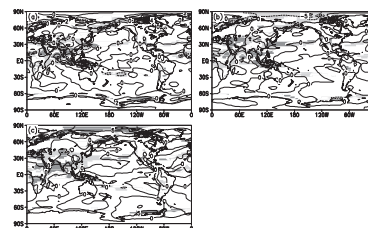


图 5 850 hPa 夏季标准化变率异常场。（a）日长 25 小时减去日长 24 小时；（b）同（a）这里为日长 25 小时减去日长 23 小时；（c）同（a）这里为日长 23 小时减去日长 24 小时。图中阴影区为超过 95% 信度检验的区域。黑色阴影表示正异常，灰色阴影表示负异常。

由图 5 可见，非洲季风和温寒带季风大致表现为慢地转条件下减弱，快地转条件下增强的特征。而亚澳季风没有明显的这种反向变化关系。季风区随地转速度的不同而发生的变化具有地理分布不均匀的特点。

IV. 结论与讨论

本文使用 NCAR 的 CAM2 大气环流模式，对不同地转速度对大气环流产生的影响进行了模拟分析。当地转速度发生地质时期尺度的变化时，年平均气候态大气环流场的结构变化不大，而大气环流的强度会发生显著变化。具体来讲，

- (1) 三圈环流的变化以慢地转条件下全球范围的环流增强，快地转条件下全球范围的环流减弱为主要特征。
- (2) 北半球温度在慢地转条件下以负异常为主，南半球以正异常为主。快地转条件下情形相反；南北半球的反向变化大致以 15°S 为界。
- (3) 地转速度变化时，纬向风场发生了正负相间的异常变化。且快地转与慢地转相反情形发生的纬度稍有南北位移。
- (4) 在慢地转条件下，原有对流层风场的辐合、辐散都得到了增强；而在快地转条件下，情形相反；

- (5) 慢地转条件下, 对流层垂直速度整体增强, 平流层 30°S 以北垂直速度增强, 30°S 以南垂直速度减弱。快地转条件下情形相反。

对于季节平均气候态来讲有以下结论:

- (1) 不同地转条件下南北半球三圈环流变化不一致。北半球三圈环流随不同地转速度的变化比较一致, 均为慢地转条件下增强, 快地转条件下减弱; 而南半球冬季慢地转条件下的增强不明显; 秋季南半球低纬度 (0°—25°S) Hadley 环流上升支和高纬度 (60°S—90°S) 反 Hadley 环流与其他纬度和季节不一致。秋季三圈环流的变化比其他季节的变化都明显。
- (2) 春季不同地转速度条件下, 整层位势高度场、整层温度场、平流层经向风场、平流层垂直速度场的变化趋势与夏、秋两个季节以及年平均气候态的结果相反。
- (3) 慢地转条件下中纬度西风加强的现象在四季都很明显, 两半球纬向风的变化趋势在春季和秋季基本反向。冬夏两半球纬向风的变化不存在明显的反向变化趋势。慢地转和快地转条件下纬向风的变化趋势是反向的。
- (4) 不同地转速度条件下各个要素场的变化有明显的季节差异。以秋季的变化最为明显。

对于不同地转速度条件下季风系统的响应, 本文有如下结论: 非洲季风和温带季风大致表现为慢地转条件下减弱, 快地转条件下增强的特征。而亚澳季风没有明显的这种反向变化关系。季风区随地转速度的不同而发生的变化具有地理分布不均匀的特点。

当然, 本文仅就有地形条件下海温设为气候态月平均资料的大气环流模式讨论了大气环流对不同地转速度的响应。还有必要对耦合模式作上述试验, 以进一步确证引发特定历史时期气候变化的决定性因子。另外, 季风气候对海陆热力差异有很大的依赖性, 把海洋的条件固定为现在的条件也是值得商榷的。进一步的海气耦合模式的试验会进一步加深我们对不同地转速度影响大气环流的理解。

致谢

本文获得兰州大学半干旱气候变化教育部重点实验室开放基金 (兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金, 项目编号: 223-860011) 和公益性行业 (气象) 科研专项项目 (GYHY200806003) 联合资助。

REFERENCES

- [1] K., Lambeck, The Earth's Variable Rotation. Cambridge University Press, 449 pp.
- [2] T. M., Eubanks, Variations in the orientation of the Earth, contribution of space geodesy to geodynamics: earth dynamics series. Vol. 24, Edited by David E. Smith and Donald L. Turcotte. Washington, D.C. AGU, pp.1-54, 1993.
- [3] V., Dehant, O. D., Viron, Earth rotation as an interdisciplinary topic shared by Astronomers, Geodesists and Geophysicists. *Adv. Space Res.*, Vol 30, pp.163-173, 2002.
- [4] H., Jochmann, H. Greiner-Mai, Climate variations and the earth's rotation. *J. Geodynamics*, Vol 21, pp.161-176, 1996.
- [5] D., Zheng, X., Ding, Y., Zhou, Y., Chen, Earth rotation and ENSO events: combined excitation of interannual LOD variations by multiscale atmospheric oscillations. *Global Planet. Change*, Vol 36, pp.89-97, 2003.
- [6] D. W., Zheng, G., Chen, Relation between equatorial oceanic activities and LOD changes. *Science in China (A)*, Vol 37, pp.341-347, 1994.
- [7] W. H., Qian, The observational study and numerical experiment on the effect of the variation of the earth's rotation on the global sea surface temperature anomaly. *Chinese J. Atmos. Sci.*, Vol 19, pp.654-662, 1995.
- [8] B.G., Hunt, The influence of the earth's rotation rate on the general circulation of the atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, Vol 36, pp.1392-1407, 1979.
- [9] J. E., Kutzbach, B. L., Otto-Bliesner, 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.*, Vol 39, pp.1177-1188, 1982.
- [10] J. E., Kutzbach, P. J., Guetter, The influence of Changing orbital parameters and surface boundary conditions on climate simulations for the past 18000 years. *J. Atmos. Sci.*, Vol 43, pp.1726-1759, 1986.
- [11] G. S., Jenkins, A general circulation model study of the effects of faster rotation, enhanced CO₂ concentrations and reduced solar forcing: Implications for the Faint-Young Sun Paradox. *J. Geophys. Res.*, Vol 98, pp.20803-20811, 1993.
- [12] G. S., Jenkins, H. G., Marshall, W. R., Kuhn, Precambrian climate: The effects of land area and Earth's rotation rate. *J. Geophys. Res.*, Vol 98, pp.8785-8791, 1993.
- [13] G. S., Jenkins, A sensitivity study of changes in Earth's rotation with an atmospheric general circulation model. *Global Planet. Change*, Vol 11, pp.141-154, 1996.
- [14] A., Hall, A., Clement, D. W. J., Thompson, A., Broccoli, C., Jackson, The Importance of Atmospheric Dynamics in the Northern Hemisphere Wintertime Climate Response to Changes in the Earth's orbit. *J. Clim.*, Vol 18, pp.1315-1325, 2005.
- [15] A. D., Del Genio, W., Zhou, Simulations of superrotation on slowly rotating planets: sensitivity to rotation and initial condition. *Icarus*, Vol 120, pp.332-343, 1996.
- [16] W.D., Collins, J.J., Hack, B.A., Boville, P.J., Rasch, D.L., Williamson, J.T., Kiehl, B., Briegleb, J.R., Mccaa, C., Bitz, S.-J., Lin, R.B., Rood, M.H., Zhang, Y.J., Dai, Description of the NCAR Community Atmosphere Model (CAM2). Boulder, Colorado, <http://www.cesm.ucar.edu/models/atm-cam/docs/cam2.0/description/index.html>, 2003.
- [17] F., Hourdin, O., Talagrand, R., Sadoury, R., Courtin, D., Gautier, C.P., McKay, Numerical simulation of the general circulation of the Titan. *Icarus*, Vol 117, pp.358-374, 1995.
- [18] A. H., Oort, J. J., Yienger, Observed interannual variability in the Hadley circulation and its connection to ENSO. *J. Climate.*, Vol 9, pp.2751-2767, 1996.
- [19] X. W., Quan, H. F., Diaz, M. P., Hoerling, Change in the tropical Hadley cell since 1950, in the Hadley Circulation : Past, Present, and Future, edited by H. F. Diaz and R. S. Bradley, Cambridge Univ. Press, New York, 2004.
- [20] J. P., Li, Q. C., Zeng, A unified monsoon index. *Geophys. Res. Letts.*, Vol 29, 115, 2002.
- [21] J. P., Li, Q. C., Zeng, A new monsoon index and the geographical distribution of the global monsoons. *Adv. Atmos. Sci.*, Vol 20, pp.299-302, 2003.