

全球山脉力矩时空变化及其与地球自转的关系

朱琳¹ 黄玫² 巩贺³ 李悦悦² 刘苏峡²

(1 国家卫星气象中心, 中国气象局, 北京 100081; 2 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

3 南京信息工程大学, 南京 210044)

摘要: 山脉力矩是大气轴向角动量变化的主要外部因子之一, 是研究地球运动和大气相互作用的关键变量。利用NCEP/NCAR第一套再分析资料计算了1948—2011年的全球山脉力矩, 定量分析了全球山脉力矩的时空变化趋势及其与地球自转速率(以日长表示)的关系。研究表明, 近64年山脉力矩变化最为显著的地区集中在青藏高原和南美的安第斯山脉, 青藏高原东西两侧的山脉力矩具有不同的变化趋势。滞后相关分析显示, 全球山脉力矩与日长的相关系数在日长滞后5年时达到最大(滞后相关系数为-0.482), 而南美安第斯山和青藏高原的山脉力矩则分别于日长滞后2年和9年时达到最大(滞后相关系数分别为-0.461和-0.689), 因此山脉力矩的变化早于日长变化。从年代际变化看, 全球积分的山脉力矩和南亚高压强度指数趋势上基本一致, 可以作为表征天气、气候变化的一个强信号。

关键词: 山脉力矩, 日长, 时空变化, 地球自转, 变化趋势

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.03.005

Spatial and Temporal Variations of Global Mountain Torque and Relations to Earth's Rotation

Zhu Lin¹, Huang Mei², Gong He³, Li Yueyue², Liu Suxia²

(1 National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

2 Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101

3 Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044)

Abstract: Mountain torque is an important external factor influencing the dynamics of axial atmospheric angular momentum and it also plays a major role in the interaction between the Earth and the atmosphere. Using the data from NCEP/NCAR reanalysis I, the daily global mountain torque during the period from 1948 to 2011 is calculated. Spatial and temporal variations of mountain torque and its relations to variations of earth rotation rate (denoted as length of day, LOD) are further discussed. It is shown that Tibetan Plateau located in East Asia and the Andes located in South America are two main areas with significant mountain torque change during the past 64 years. Mountain torque at east and south sides of Tibetan Plateau has different trends. Moreover, mountain torque and LOD are lag correlated. Maximal correlation occurred respectively when global mountain torque leads LOD five years ($R=-0.482$), Andes Mountain torque leads LOD two years ($R=-0.461$) and Tibetan Plateau mountain torque leads LOD nine years ($R=-0.689$), suggesting that mountain torque forces LOD anomalies. On a decadal scale, global mountain torque has a similar trend with intensity index of South Asian High, indicating that mountain torque can be a very useful signal for climate change.

Keywords: mountain torque, length of day, spatial-temporal variation, Earth's rotation, long-term trend

1 引言

山脉力矩(mountain torque, MT)是指在地球起伏表面的东西两侧, 由于地表面气压不同而产生的转动力矩^[1-2]。山脉力矩是深入研究地球自转和大气之间的相互作用过程的关键参数之一^[1, 3-5]。在不考虑月亮和太阳等对地球一大气系统产生的外部力矩的情况

下, 地球和大气系统总体角动量守恒^[6]。地球和大气之间通过山脉力矩和摩擦力矩作用进行角动量交换, 从而对地球自转速度和大气环流产生深远影响(重力波力矩的量级相对较小, 可以忽略)^[7-8]。

早在20世纪40年代, 气象学家就开始关注地球自转变化对气候的影响, 但研究结果受观测资料精度的限制, 存在很大的不确定性^[8]。20世纪80年代后, NCEP/NCAR用同化后的全球气象资料重新归算得到了精度和分辨率更高的全球大气角动量数据, 进一步推动了大气角动量和日长变化的研究。大量的观测和统计分析表明, 全球大气的相对角动量在天、月、年

收稿日期: 2013年11月29日; 修回日期: 2014年4月10日

第一作者: 朱琳(1978—), Email: zhulin@cma.gov.cn

通信作者: 黄玫(1968—), Email: huangm@igsrr.ac.cn

资助信息: 国家重点基础研究发展计划项目(2012CB957802)

以及年代际时间尺度上都发生了大量变化。同时也有明确证据表明, 固体地球的角动量在日和年的尺度上对大气相对角动量的变化具有较好的补偿关系^[6, 9-11], 这一过程主要通过大气和固体地球之间轴向角动量的交换完成^[4]。

然而, 仅从统计分析的角度难以理解地球和大气的相互作用过程和机理。山脉力矩和摩擦力矩作为地球和大气交换角动量的主要作用力, 越来越受到研究者的关注。Ponte等^[12]的研究表明, 大气角动量在1982—1983年El Niño事件时达到正的极端峰值, 这一异常主要与北美和欧洲持续的总的山脉力矩作用有关。随后, 受负的摩擦力矩作用, 大气角动量逐渐衰退至正常值。Viron等^[13]研究表明, 在1989年La Niña事件鼎盛时期, 全球轴向大气角动量达到年代际尺度的最小值。大气角动量的这一异常变化主要是北美、南美和欧洲山脉力矩异常引起的^[8, 14-15]。以上研究空间区域小(局部地区)且时间尺度短(天气尺度), 同时研究对象仅限于力矩和大气角动量的关系, 针对长时间序列山脉力矩的时空变化和日长关系的研究比较少。

为了进一步研究山脉力矩的时空变化规律及其与地球自转速率的关系, 本文利用NCEP/NCAR第一套再分析资料计算了1948—2011年全球山脉力矩, 重点分析了山脉力矩的时空变化特征及其与日长的关系。本研究可为从机理上分析地球自转速度变化和大气相互作用过程及相应的气候模拟提供科学依据。

2 数据与方法

2.1 使用的数据

采用NCEP第一套再分析资料T62模式输出的6h时间分辨率的地表面压力自然对数的第一光谱系数和地形高度数据转化成高斯格点数据, 计算全球山脉力矩。计算出的全球山脉力矩时间分辨率是1d, 空间分辨率是192×94高斯格点, 时间跨度为1948—2011年。

2.2 山脉力矩的计算及验证

全球积分形式的山脉力矩可用以下形式计算^[1]:

$$T_M = -a^2 \int_0^{2\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} P_{sfc} \frac{\partial h}{\partial \lambda} \cos \varphi d\varphi d\lambda \quad (1)$$

式中, a 为地球半径, P_{sfc} 为地表面气压, h 为地形高度, λ 为经度, φ 为纬度。

为了验证计算的正确性, 将本文计算的1958—2012年月平均的全球山脉力矩积分结果和NOAA地球系统研究实验室(Earth System Research Laboratory)公布的同时期的山脉力矩的结果^[16]进行了对比。由图1a和1b对

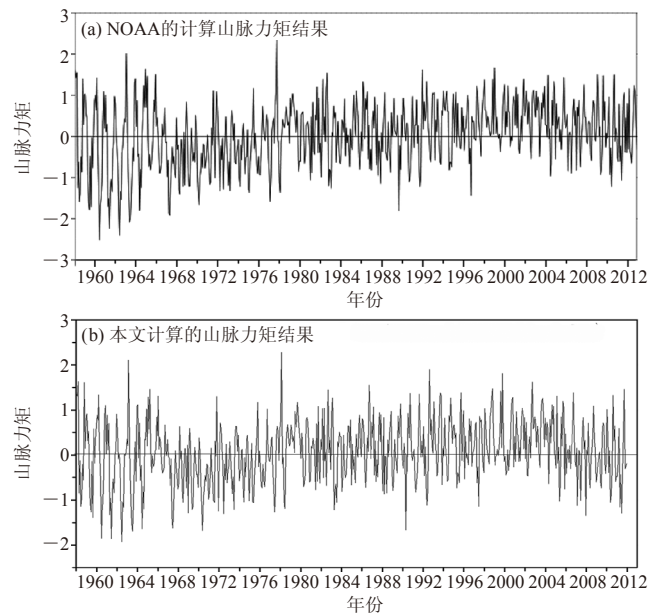


图1 NOAA计算的全球山脉力矩与本文计算的全球山脉力矩结果的对比(单位: $10^{19} \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)

比可见, 本文的计算结果和NOAA公布的山脉力矩在对应的时间内量级和变化趋势一致, 说明计算结果是可信的。

2.3 变化趋势分析

通过线性拟合方法($y=ax+b$)分析各个力矩的变化趋势, 即:

$$a = \frac{\left[n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i \right]}{\left[n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right]} \quad (2)$$

其中, n 代表年数, 等于64, x_i 代表年份(1, 2, 3, ..., 64), y_i 为第 i 年的力矩大小。当 a 大于0时, 表示力矩呈上升趋势, 如果小于0, 则呈下降趋势。

3 研究结果

3.1 全球山脉力矩变化趋势

从空间分布看(图2), 山脉力矩的变化趋势存在明显的空间差异。山脉力矩变化最为显著的地区集中在欧亚大陆的中南部和南美洲安第斯山脉, 其中以青藏高原区域变化最为剧烈。在喜马拉雅山脉的西南侧, 山脉力矩呈现明显的降低趋势, 每年减少 $4 \times 10^{15} \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 以上; 而在喜马拉雅山东部和北部局部, 山脉力矩呈现增加趋势, 部分地区每年增加的幅度大于 $6 \times 10^{15} \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 。青藏高原东西两侧的山脉力矩变化具有相反的趋势, 对全球积分的山脉力矩的贡献具有一定的相互抵消作用。山脉力矩在安第斯山脉中部局部呈现一定的上升趋势, 但较喜马拉雅山脉附近变化趋势较小。全球其他地区变化趋势不明显。

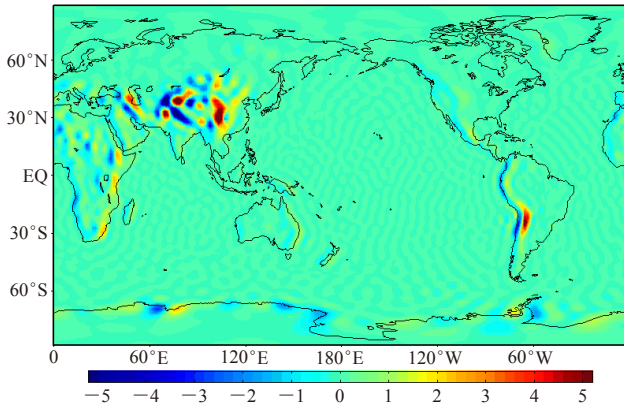


图2 NCEP第一套再分析资料计算出的1948—2011年全球山脉力矩变化趋势 (单位: $10^{15}\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$)

3.2 山脉力矩的变化与日长的关系

从时间序列的变化上看, 年平均的全球山脉力矩 (图3中蓝线所示) 与日长具有相反的变化趋势, 即在日长达到峰值时, 对应山脉力矩达到低谷 (图3中红色圆圈标记区域表现最为明显), 峰值分别出现在1972年和2003年前后, 但两者之间存在一定的滞后效应。

为了进一步探讨全球不同区域山脉力矩变化和日长的关系, 选取山脉力矩变化最为剧烈的亚洲青藏高原东西两侧和南美安第斯山脉, 分区域统计了山脉力矩和日长的滞后相关关系 (图4)。

全球山脉力矩和日长在滞后0年的相关系数为-0.208, 随着日长滞后时间的增加, 负相关系数不断增加, 日长在滞后全球山脉力矩5年时两者达到最大负相关 (-0.482)。日长在超前全球山脉力矩时, 相关系数较低, 但超前5年以后相关系数变为正, 超前11年时二者达到最大正相关0.319 (图4a)。

青藏高原区域山脉力矩与日长的相关在滞后0年时为0.308, 日长在滞后9年和超前6年时达到极大值,

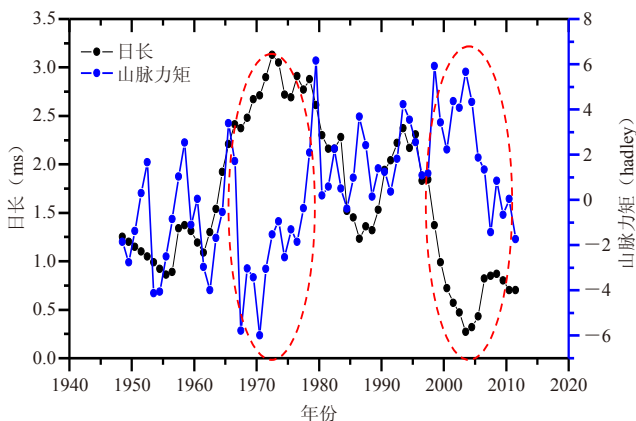


图3 日长与近65年山脉力矩的年际变化特征

分别为-0.461和0.433 (图4b)。由于青藏高原东西两部分山脉力矩的变化趋势完全相反 (图2), 因此将青藏高原分为东、西两部分考虑山脉力矩与日长的关系。研究发现, 青藏高原东、西两部分山脉力矩与日长的关系完全相反, 在日长滞后9年时, 青藏高原东西两侧山脉力矩和日长达到最大相关, 相关系数分别为-0.689和0.625 (图4c-d)。东部山脉力矩与日长的关系与整个青藏高原山脉力矩与日长的关系较为一致 (图4b-c)。

南美洲安第斯山脉附近的山脉力矩与日长的相关以负相关为主, 在日长滞后南美山脉力矩0年时为-0.413, 滞后2年时达到最大相关值-0.443 (图4f)。北美洲的洛基山脉对日长的响应较弱, 滞后相关系数普遍较低 (图4e)。

从全球山脉力矩变化剧烈区域的山脉力矩与日长的相关分析来看, 日长滞后于山脉力矩时的相关系数绝对值高于日长超前山脉力矩。说明山脉力矩在一定程度上驱动日长变化。

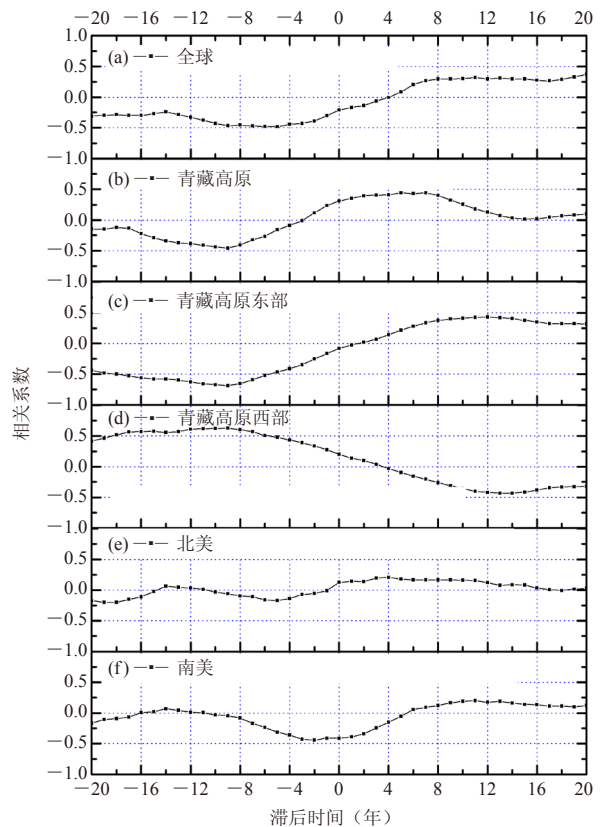


图4 日长与近65年山脉力矩的滞后相关 (其中, 青藏高原的空间范围: $26^{\circ}\text{--}39.8^{\circ}\text{N}$, $73.3^{\circ}\text{--}104.8^{\circ}\text{E}$; 青藏高原东部的空间范围: $99.4^{\circ}\text{--}112.5^{\circ}\text{E}$, $24.9^{\circ}\text{--}44^{\circ}\text{N}$; 青藏高原西部的空间范围: $63.8^{\circ}\text{--}90^{\circ}\text{E}$, $24.9^{\circ}\text{--}47.9^{\circ}\text{N}$; 北美的空间范围: $52.5^{\circ}\text{--}166.9^{\circ}\text{W}$, $11.5^{\circ}\text{--}72.8^{\circ}\text{N}$; 南美的空间范围: $58.1^{\circ}\text{--}73.1^{\circ}\text{W}$, $11.49^{\circ}\text{--}34.47^{\circ}\text{S}$)

3.3 山脉力矩、日长的变化与南亚高压的关系

由图3可见,全球山脉力矩与日长同时具有明显的年际和年代际变化趋势。山脉力矩作为地球和大气之间轴向角动量变化的主要驱动力,必然对年代际大气环流产生深远影响,是天气、气候变化的一个强信号。由图5可以发现,全球积分的山脉力矩和南亚高压强度指数^[17]在年代际变化趋势上基本一致,相关系数达到0.84。在20世纪60年代中期,山脉力矩超前南亚高压达到低谷;到20世纪90年代,南亚高压的变化又超前于山脉力矩的变化。上述山脉力矩和南亚高压的年代际变化表现了大气和地球之间不同的相互作用。

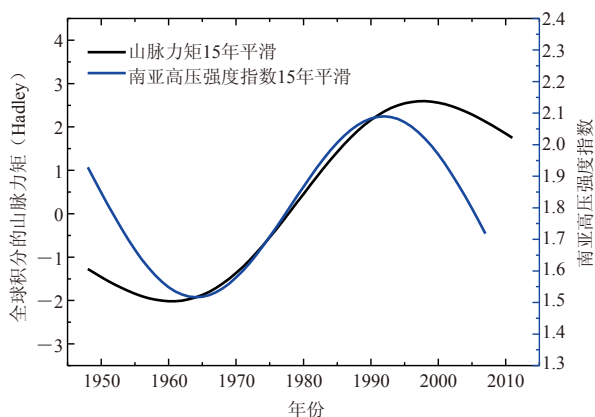


图5 全球山脉力矩与南亚高压强度指数的年代际变化趋势

4 结论

山脉力矩是地球和大气交换角动量的重要途径之一。本文利用NCEP/NCAR第一套再分析资料计算了近64年来的全球山脉力矩,定量分析了山脉力矩的时空变化趋势及其与日长的关系,得出以下结论:

(1) 近64年全球山脉力矩变化最显著的地区是欧亚大陆的中南部和南美洲安第斯山脉,其中以青藏高原区域变化最为剧烈。青藏高原东西两侧的山脉力矩变化具有相反的趋势。在喜马拉雅山脉的西南侧,山脉力矩以每年 $4 \times 10^{15} \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 的速度减少,而在喜马拉雅山东部和北部区域,山脉力矩则以每年 $6 \times 10^{15} \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 的速度增加。

(2) 全球山脉力矩与日长的相关系数在日长滞后山脉力矩5年时达到最大,且二者为负相关。青藏高原、南美洲安第斯山山脉力矩分别在日长滞后9年和2年时达到最大负相关。青藏高原西侧山脉力矩与日长的关系与全球其余地区都不一致,在日长滞后9年时达到最大正相关,其原因还有待进一步研究。

(3) 全球积分的山脉力矩和南亚高压强度指数在年代际变化趋势上基本一致,表明山脉力矩年代际变化对大气环流产生深远影响,可以作为天气、气候变化的一个强信号。

致谢:感谢欧亚科学研究院中国科学中心彭公炳院士对本文给予的诸多有益指导和建议;感谢NOAA的Klaus M. Weickmann教授和中国气象科学研究院王亚非研究员提供山脉力矩计算程序,并对计算给予帮助;感谢审稿专家对本文提出的建设性意见和建议。

参考文献

- [1] Weickmann K M, Sardeshmukh P D. The atmospheric angular momentum cycle associated with a Madden-Julian oscillation. *J Atmos Sci*, 1994, 51(21): 3194-3208.
- [2] Driscoll S. The Earth's atmospheric angular momentum budget and its representation in reanalysis observation datasets and climate models. MS thesis of University of Reading, 2010.
- [3] White R M. The role of mountains in the angular-momentum balance of the atmosphere. *J Meteor*, 1949, 6(5): 353-355.
- [4] Wahr J M, Oort A H. Friction- and mountain-torque estimates from global atmospheric data. *J Atmos Sci*, 1984, 41: 190-204.
- [5] Weickmann K M. Mountains, the Global Frictional Torque, and the Circulation over the Pacific-North American Region. *Monthly Weather Review*, 2003, 131: 2608-2622.
- [6] Oort A H. Angular momentum cycle in the atmosphere-ocean-solid earth system. *Bulletin American Meteorological Society*, 1989, 70: 1231-1242.
- [7] De Viron O, Bizouard C, Salstein D, et al. Atmospheric torque on the earth and comparison with atmospheric angular momentum variations. *J Geophys Res*, 1999, 104(B3): 4861-4875.
- [8] Rosen R D. The axial momentum balance of Earth and its fluid envelope. *Surv Geophys*, 1993, 14: 1-29.
- [9] Starr V P. An essay on the general circulation of the Earth's atmosphere. *J Meteor*, 1948, 5: 39-43.
- [10] Munk W H, Miller R. L. Variations in the Earth's angular velocity resulting from fluctuations in atmospheric and oceanic circulation. *Tellus*, 1950, 2: 93-101.
- [11] 周永宏, 郑大伟. 日长年际变化、El Niño南方涛动和大气准两年振荡的小波分析. *天文学报*, 1997, 38: 209-214.
- [12] Ponte P R, Rosen R D. Torques Responsible for Evolution of Atmospheric Angular Momentum during the 1982-83 El Niño. *Journal of the Atmospheric Science*, 1999, 56: 3457-3462.
- [13] Viron O, Marcus S L, Dickey J O. Atmospheric torques during the winter of 1989: Impact of ENSO and NA O positive phases. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(10): 1985-1988.
- [14] Hide R, Dickey J. The earth's variable rotation. *Science*, 1991, 253: 629-637.
- [15] Oort A H, Bowman H D. A study of the mountain torque and its interannual variations in the Northern Hemisphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1974, 31: 1974-1982.
- [16] Global Monthly Mountain torque, distributed by NOAA Earth System Research Laboratory, http://www.esrl.noaa.gov/psd/map/images/reanalysis/total_fields/taum.total.58-curr.reanal.gif.
- [17] 南亚高压强度指数数据,源自南京大气资料服务中心, <http://nadsc.nuist.edu.cn/zhshxz.php>.