

地球自转运动与大气、海洋活动

周永宏 郑大伟 虞南华 廖新浩

(中国科学院上海天文台, 上海 200030; 中国科学院国家天文观测中心, 北京 100012; 中国科学院天文地球动力学联合研究中心, 上海 200030)

摘要 地球自转运动(自转速率变化和地极运动)表征着地球的整体运动状态以及固体地球与大气和海洋各种时空尺度上的相互作用过程, 它们在维持总角动量守恒的条件下, 构成了复杂的地球动力学系统. 近代空间大地测量技术的应用和发展大大促进了地球自转与大气和海洋活动相互作用的研究. 着重综述地球自转运动与大气和海洋活动以及热带海气相互作用方面的研究进展, 并展望未来理论研究的课题和方向.

关键词 地球自转 大气活动 海洋活动 ENSO

地球自转运动不仅表征地球整体的运动状态, 也反映了固体地球与大气、海洋、地幔和地核在各种空间和时间尺度上的耦合过程^[1, 2]. 地球自转运动主要分为两部分: 一是地球自转速率的变化, 直接反映的观测是日长变化; 二是地球瞬时自转轴相对于地球表面或历元平极的运动, 即地极运动, 或简称为极移.

近 30 年来,空间大地测量技术(如甚长基线干涉(VLBI)、人卫激光测距(SLR)和全球定位系统(GPS))的飞速发展使地球自转运动测定的空间分辨率达到亚毫角秒级,时间分辨率达到几天甚至几个小时^[3].与此同时,大气和海洋环流模型的建立和完善、海洋卫星测高和 GPS 测量大气参数等新技术的应用,也大大促进了大气和海洋活动规律的研究.

随着天文、气象和海洋观测技术和理论的发展,地球自转运动与大气和海洋活动的研究已成为国际上新兴的交叉学科课题.1995 年, IUGG/IAG 专门设立了大气和海洋与地球自转相互作用的专题研究组(SSG-5.173).1998 年,国际地球自转服务机构(IERS)在庆祝成立 10 周年之际,决定组建全球地球物理流体中心(GGFC),它下辖有大气、海洋、陆地水、潮汐、地核、地幔和地心共 7 个分中心,每个分中心将定期公布其最新的观测数据和模型研究成果,以支持和推动国际上固体地球与大气和海洋等各圈层相互作用的研究领域的发展.

将地球自转与大气和海洋结合起来的研究,不仅促进地球自转物理机制的探索,而且也作为大气和海洋动力学提供新的外部约束,推动天文与大气和海洋研究领域的相互交叉.目前正在进行的美国固体地球与自然灾害计划(SENH)和我国主持的亚太地区空间地球动力学计划(APSG)均将这方面工作列为研究的重点之一.本文将着重综述目前国际上地球自转运动与大气、海洋活动以及热带海气相互作用方面的研究进展,并展望今后理论研究的课题和方向.

1 地球自转运动与大气活动

1.1 日长变化与大气活动

日长在季节性、亚季节性和年际时间尺度上的变化与全球大气活动有着密切的关系^[4].日长的季节性变化,由一个周年项和一个半年项组成,前者变化的幅度约 0.4 ms,后者约 0.3 ms.两种波动叠加在一起,出现两个波峰,其幅值变化的极小值通常位于 1 和 7 月^[5].

光学天体测量资料存在季节性的系统误差,而空间大地测量资料的季节性误差要小得多^[6].去除幅度相当大的半周年潮汐项后,日长的季节性变化主要是因为作用于固体地球表面的摩擦力矩和山脉力矩,引起大气和固体地球之间轴向角动量的交换^[7].日长季节性变化中的 90%以上来源于风速变化,剩余部分则来自大气压变化和海洋的激发^[8].

称日长在几天和几十天时间尺度上的波动为日长的亚季节性变化.它包括一个显著的 50 d 左右的准周期波动(常简称为“50 d”波动)和一个宽带连续谱,它们主要由大气激发^[9].Dickey 等人^[10]研究发现,对于周期大于 8 d 的亚季节性波动,日长变化和轴向大气角动量(AAM)间的凝聚性都比较显著,在周期小于 8 d 时,凝聚性减弱.这可能是资料中的随机误差或未考虑的激发源所致.在日长亚季节性变化中,讨论得最多的是“50 d”波动.采用中国的天文测时资料,郑大伟^[11]由 AR 谱技术发现世界时 UT1 的高频变化中存在近 50 d 的波动过程.随后,Feissel 等人^[12]用空间大地测量的 4 种独立的 UT1 资料,Langley 等人^[13]用 4 a 的气象资料和激光测月技术观测到的日长资料,都分析得到明显的“50 d”波动,从而证实了这一发现.李志安等人^[14]假设日长“50 d”波动为一种偶然激发的衰减振荡,估计出它的共振周期范围在 45~52 d 之间.

热带太平洋上的纬向风同样存在着 50 d 左右的变化,称为 Madden-Julian 波动^[15].人们还在热带大气对流、地球位势、季风雨量和印度洋环流和太平洋海平面高度等物理量中找到类

似的亚季节性波动. 对于这种波动的起源, Madden^[16]假设它是热带振荡在全球的反映, 而 Ghil 等人^[17]认为, 它是由亚热带大气纬向流动的内在不稳定性激发的, 这种内在不稳定性源于大气激流与巨大山脉之间的相互作用. 对于“50 d”波动的物理机制, 目前仍无定论.

日长年际变化指日长在几年时间尺度上的波动, 其幅度可达0.5 ms, 与日长季节性变化的幅度相当. 研究表明, 大部分日长年际变化由大气激发, 其余来自海洋, 所以日长年际变化与海、气活动密切相关.

1991年, 美国国家环境预测中心和大气研究中心(NCEP/NCAR)合作提出一项重新分析计划^[18], 对美国国家气象中心(NMC, NCEP的前身)使用的全球资料同化系统(GDAS)作了多处改进, 并采用了更完备的资料, 所以, 重新归算后的AAM序列比过去的NMC-AAM序列具有更高的精度. Yu等人^[19]采用这一新的AAM序列重新进一步研究大气与地球自转的关系. 结果得出, 新的AAM序列具有噪声小和分辨率高的特点, 它显著地改善了亚季节性到年际时间尺度上大气对日长变化激发的贡献, 尤其是在准两年时间尺度上, AAM和日长变化的符合度更好.

高精度的日长变化序列还可作为全球大气和海洋环流模型检验的一种重要参考依据. 周永宏等人^[20]将日本气象厅(JMA)全球环流模型模拟的轴向AAM与日长变化序列作比对, 发现该模型对轴向AAM的周年分量模拟很好, 而对半年分量的模拟较差, 其原因是该模型对亚热带纬向风的模拟出现偏差.

1.2 极移与大气活动

极移主要包括12和14个月的周期项, 即周年极移和Chandler极移. 人们很早就注意到大气质量的季节性变化对周年极移的影响. 众多学者应用各种气象资料计算了大气对周年极移的激发, 但由于资料的精度问题, 所得结果存在着一定的差异^[21~23]. 周永宏等人^[24]采用近代空间大地测量技术观测到的极移序列和美国NCEP/NCAR重新归算的AAM, 分析了1985~1995年大气对(顺向和逆向)周年极移的激发. 结果表明, 虽然大气对周年极移起主要的激发作用, 但大气的激发与观测到的激发量, 在幅度和位相上都存在着相当大的差异, 剩余的激发来自海洋与陆地水分布的变化等.

1891年, Chandler在寻求纬度观测中的自由Euler周期项(305 d)时发现了14个月左右的周期性摆动, 即Chandler摆动, 理论和实测的这一差异已由弹性地球模型解释^[1]. 作为自由运动, 由于地幔滞弹性等能量耗散源的存在^[25], Chandler摆动应是一个逐渐衰减的过程, 但100余年的观测表明其振幅虽有变化, 没有系统地减小. 这说明一定存在某些激发因素在克服阻尼而维持着这种运动.

Chandler摆动的维持机制可能有4种: 周期强迫、参数共振、非线性效应和随机摄动. 其中, 随机摄动理论最有可能解释Chandler摆动激发的维持问题. 如果是周期强迫来维持Chandler摆动, 那么这个周期必须是Chandler周期, 而Chandler周期是由整个地球的固有性质决定的. 从概率上讲, 地球的局部物质运动不大可能形成具有Chandler周期的强迫. 事实上, 到目前为止, 还没有发现具有明显Chandler周期的周期强迫源. 参数共振发生的原因实质上是转动惯量存在接近Chandler频率或其整数倍数的周期变化. 从初步的量级估计看来, 参数共振的条件很难得到满足. 如果考虑激发地球自转的Liouville方程中的非线性效应, 地球自

转速率的长期减慢可以使 Chandler 摆动的振幅增加,但其量级很小,不足以维持 Chandler 摆动.

一个惯常的假设是将 Chandler 摆动的激发信号看成 Gauss 白噪声,而将大气作为 Chandler 摆动的宽带激发源^[26]. Munk 等人^[27]计算了大气对 Chandler 摆动的激发,认为大气质量的重新分布对 Chandler 极移的影响很小. Wilson 等人^[28]的结果则反映了另一种看法,大气的 Chandler 激发占实测激发能量的 1/4. Vondrak^[29]分析了 11.5 a 长的空间大地测量资料后得出,大气激发了 Chandler 摆动的 10%~20%. Chao^[30]在分离出 1986~1990 年实测资料中 Chandler 极移的激发后,认为 AAM 对 Chandler 极移具有较大的贡献. Furuya 等人^[31]采用 1983 年以后约 11 a 的日本气象厅和美国国家气象中心归算的 AAM 资料,进一步分析出, AAM 中的风项比气压项对 Chandler 极移激发的贡献更为显著.

极移在几年时间尺度上也存在着变化,简称为年际极移. Abarca 等人^[32]应用周期图和小波变换技术分析极移序列中的年际变化,发现了两个显著的分量:准两年分量和大约 4~6 a 的周期分量. 他们接着比较 1980~1991 年的极移激发序列与 AAM 资料,结果表明,在准两年周期上它们的相关性较强;在 4~6 a 的较长周期上,极移的东向分量与 AAM 符合较好,而在北向分量上符合较差. 其实,年际极移的一个重要激发源来自北大西洋涛动. 北大西洋涛动的基本特征为:副热带反气旋带至冰岛附近副极区近南北方向、年际时间尺度上的气压振荡^[33]. 其强度通常由海面温度、海平面气压或高度场构造的指数来描述. Zhou 等人^[34]发现北大西洋涛动指数与年际时间尺度上极移激发函数之间存在强相关性,并通过初步的动力学理论分析得出,北大西洋涛动对年际极移的激发具有重要的贡献.

现代空间大地测量比传统光学观测的精度大约提高了两个量级,可以给出每天(甚至几小时)间隔的极移数据. 这样人们发现了亚季节性极移. Eubanks 等人^[35]应用 1983~1986 年间 SLR 和 VLBI 观测的极移序列以及 JMA 和 NMC 的 AAM 资料,研究了大气对亚季节性的极移激发,结果表明, AAM 中的气压项可以解释亚季节性极移的 60%. 谢伯全等人^[36]全面考虑了大气中气压项和风项的影响,在 1983~1992 年期间,大气对亚季节性极移激发的贡献达到 70%,剩余的部分可能来自海洋.

2 地球自转运动与海洋活动

2.1 日长变化与海洋活动

大气环流的角动量理论已相当成熟. 然而由于海洋洋流运动比大气环流复杂得多,角动量方法难以在海洋动力学研究中得到广泛的应用. 人们在分析地球自转变化和全球角动量平衡时,才涉及到全球平均海洋角动量的研究. 过去由于缺少实测或海洋环流模型模拟的全球海洋速度场和质量场数据,因而不可能得到较精确的海洋角动量(OAM). 近年来,海洋数值模拟技术的发展和大型并行计算机的采用,大大促进了海洋环流模型的建立和完善,现今海洋模型已经能够在各种边界条件下进行数值模拟,为开展地球自转与海洋活动的研究创造了有利的条件^[37].

Brosche 等人^[38]应用数值海洋模型研究海洋对日长季节性变化的激发作用,认为海洋的贡献在 20 μs 量级. Dickey 等人^[39]估算出绕南极流对日长周年变化的激发量约为 2~4 μs . Marcus 等人^[40]采用两个独立的海洋环流模型,输入 1992~1994 年海表面温度、盐度和风应力等,模拟

出该 3 a 的海洋角动量. 结果表明, 海洋洋流和质量分布的变化对日长变化具有一定的影响, 利用海洋环流模型可以模拟或检测到季节性和更短时间尺度上海洋对日长变化的贡献. Johnson 等人^[41]应用并行海洋气候模型, 计算了 1988~1998 年海洋角动量, 得出海洋活动可以解释相当部分的年际到亚季节性时间尺度上扣除大气效应后的日长变化.

长期以来对海平面变化的研究主要依赖于验潮站的资料. 郑大伟等人^[42]采用太平洋地区近 300 个验潮站的海平面资料研究地球上赤道和高纬度地区的海平面年际变化与相应的日长变化之间的关系, 发现在地球自转加速时, 赤道太平洋平均海平面上升, 高纬度带海平面下降; 当地球自转减速时, 赤道带海平面下降, 高纬度带海平面上升.

1992 年 8 月发射的 TOPEX/POSEIDON 海洋测高卫星使得对全球海平面的高精度观测成为可能^[43]. 郑大伟等人^[44]采用 1992 年 12 月~1994 年 12 月 TOPEX 海平面资料, 研究发现季节性时间尺度上日长变化与海平面变化的相关性.

2.2 极移与海洋活动

Ponte 等人^[45]和 Johnson 等人^[41]采用不同的海洋环流模型, 研究海洋对年际至亚季节性时间尺度上极移的激发. 他们的研究结果均表明, 海洋角动量函数与扣除大气效应后的极移激发函数具有显著的相关性或凝聚性. 海洋活动可以解释相当部分年际到亚季节性时间尺度上除大气以外的极移激发量, 海洋还对 Chandler 摆动的激发具有一定的贡献.

周永宏等人^[24]采用美国麻省理工学院(MIT)海洋环流模型模拟出的 1985~1995 年海洋角动量序列, 分析了海洋活动对周年极移的激发. 结果发现, 海洋的激发量接近大气的一半, 海洋与大气激发的总量, 比起只考虑大气, 更接近于观测到的周年极移激发量. 当然, 大气与海洋激发量的和与观测到的周年极移激发量仍存在一定的偏差. 这说明还需要考虑其他的一些激发因素, 例如陆地水分布的周年变化. 有关陆地水对极移激发的贡献, 由于采用不同的数据, 目前给出的结果存在很大的差别^[46, 47]. 未来几年的卫星重力测量技术可望大大提高全球水贮量的观测精度, 从而最终解决这一问题^[48].

3 地球自转运动与热带海、气相互作用

3.1 热带海、气相互作用——ENSO 事件

热带约占地球面积的 1/2, 大部分为海洋, 接收太阳的辐射能量最多. 它既是大气中水汽能量的主要源地, 也是地球上海、气相互作用最活跃的区域.

El Niño 事件突出反映热带大气和海洋的相互作用过程. 它的基本特征是在赤道东太平洋地区的海水表面温度出现异常上升^[49]. 正常年份, 东太平洋赤道带的海面水温要比西太平洋区域低. 其原因是: 秘鲁寒流沿南美大陆西侧北上, 其中一部分变成南赤道海流向西移动; 沿低纬海域向西的信风使赤道附近的暖水向太平洋西侧积聚; 相随于信风, 下层冷海水在东太平洋带涌升. 在某些年份, 当太平洋上的信风突然衰减时, 西太平洋的暖水开始沿赤道向东移动, 并在东太平洋聚积. 这时, 从南美沿海到太平洋东部赤道区域, 海面水温高于常年, 出现 El Niño 事件.

自 20 世纪 70 年代以来, 在 1972~1973, 1976~1977, 1982~1983, 1986~1987, 1991~1992, 1993, 1994~1995 和 1997~1998 年相继发生了 8 次 El Niño 事件. 其中, 以 1982~1983 和 1997~

1998 年的两次 El Niño 事件最强^[50]。每两次 El Niño 事件之间的时间间隔约在 2~7 a 之间, 这种年际时间尺度上非周期性的太平洋海面温度变化是 El Niño 事件的一个重要特征。

热带大气的南方涛动与 El Niño 事件有着密切的联系, 它反映太平洋上大尺度范围里气压的一种长期不规则变化^[51]。在太平洋赤道区域常出现两个大气团, 一个是中心在南太平洋复活节岛附近, 另一个是在印度尼西亚附近。在正常年份, 复活节岛是高气压, 较强的信风使赤道海面上的空气自东太平洋流向西太平洋, 并在低气压的印度尼西亚和澳大利亚北部一带海水温暖区域上升, 升至高空的空气返流回东太平洋, 并在海水低温区域下沉。这样, 赤道太平洋上空的气流在整体上形成了一个东西环流, 即著名的 Walker 环流。这种状态并非永恒不变, 在某些年份, 复活节岛和印度尼西亚的气压发生反向变化。这时, 信风和 Walker 环流减弱。东西太平洋上的气压出现这种宛如翘翘板式的上下振动现象, 称为南方涛动。

由于 El Niño 事件伴随于南方涛动过程中, 所以, 常常把它们合称为 El Niño/南方涛动(简称 ENSO)现象。近些年的一系列研究表明, ENSO 信号不仅存在于热带地区的海面温度、气压、风和云量以及洋流强度等要素场的变化中, 而且在世界许多地区的大气环流和气候的年际变化中有所反映^[52~54]。

3.2 地球自转运动与 ENSO 事件

随着海洋和大气上观测手段的改进和观测规模的扩大, 近些年来广泛开展的 El Niño 事件的研究热潮更进一步促使人们探讨固体地球自转运动与热带海、气相互作用的联系。

Stefanick^[55]最早报告 ENSO 和 AAM 年际变化间的相关性。Rosen 等人^[56]从日长变化和 AAM 序列中发现 1982~1983 年强 El Niño 事件的信号。Chao^[57~59]认为日长年际变化主要来自于南方涛动和大气准两年振荡。郑大伟等人^[60]得出, 日长年际速率变化与东太平洋赤道带海温变化以及用全球带风资料归算的 AAM 年际变化之间都存在着很好的一致性, 其中大气的年际变化超前 1~3 个月。由此, 通过动力学定量的初步分析后, 他们认为地球自转的年际变化和 El Niño 事件分别是固体地球和海洋各自对大气环流异常的响应^[61]。

郑大伟等人^[62]采用 1962~1990 年国际 TOGA 计划海平面中心的观测资料, 研究赤道带海洋活动与日长变化的关系。结果表明, 太平洋赤道带的表层海水存在着大尺度范围的东、西向迁移运动过程, 它对日长年际速率变化激发的平均贡献约为 30%。他们还进一步计算了热带太平洋(20°N~20°S)上层海水体积的变化, 发现其最大变化可达 10^{15} m^3 量级, 而且热带太平洋上层海水体积的变化与日长年际变化呈明显的反相关系, 且日长变化超前。即地球自转的年际速率变化可能反作用于海洋, 对热带太平洋海水的分布变化产生一定的影响。

刘式适等人^[63]应用描述低纬地球流体的水平运动方程, 从动力学角度分析地球自转速率变化对低纬大气和海洋振荡的影响, 结果指出, 地球自转速率变化不但会影响低纬大气和海洋振荡的振幅, 而且会影响纬向风和洋流的变化, 从而导致海平面的变化。

郑大伟等人^[62]研究提出了地球自转运动与赤道带海洋活动相互作用的一种模式, 它可由图 1 所示的两种状态来描述。在状态 1 时期, 向西的强信风作用使太平洋赤道带的洋流向西流动, 导致东太平洋海平面下降, 西太平洋海平面上升。向西信风和赤道带洋流产生与地球自转反向的角动量变化, 使地球自转速率加快。地球自转年际变化的加速反作用于海洋, 使南、北太平洋的表层暖海水分别向赤道带集聚, 加速了西太平洋区域海平面的上升。在状态 2 时期,

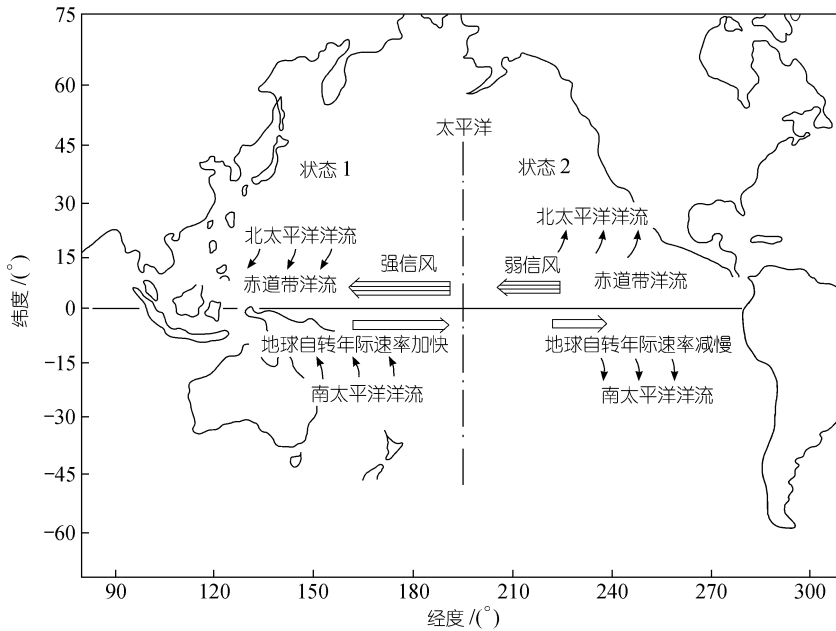


图1 两种状态所组成的赤道带海洋活动与地球自转相互作用过程

信风减弱或出现异常, 相对于状态 1 而言, 使太平洋赤道带洋流向东流动, 东太平洋海平面上升, 西太平洋海平面下降, 信风异常和赤道带洋流产生与地球自转同向的角动量变化, 使得地球自转速率减慢. 地球自转年际变化的减速又反作用于海洋, 使赤道表层暖海水向南、北半球扩张, 这将减弱东太平洋赤道区域海平面上升速率. 在上述地球自转与赤道带海洋活动相互作用的过程中, 地球自转年际速率的变化对 El Niño 事件期间太平洋海平面变化产生一定的影响. 这种影响的迹象, 在利用 TOPEX 卫星测高技术监测 1997~1998 年 El Niño 事件的过程中得到反映和证实^[64].

在热带海洋、大气与地球自转的相互作用中, 虽然大气的异常变化在这个过程中起主导作用, 但地球自转年际速率的变化也反作用于热带海洋, 并影响着 El Niño 的形成时期. Eubanks 等人^[65]研究发现日长年际变化与描写 ENSO 事件强度的南方涛动指数(SOI)存在着负相关现象, 且日长超前约 26 个月. 这为利用日长资料预报 El Niño 事件提供了可能性. Zheng 等人^[66]通过归算和监视日长年际变化极小值的方法, 成功地预测了 1991~1992 年的 El Niño 事件.

除了以上所述的年际波动外, 日长的亚季节性变化也可能和 ENSO 事件存在一定的联系. 在 1982~1983 年的 El Niño 事件期间, 日长的“50 d”亚季节性波动异常剧烈. 与此同时, 由于 5°~30°N 异常强烈的纬向风的影响, 轴向 AAM 的变化也达到极大值^[56]. Eubanks 等人^[65]认为, 在 El Niño 事件期间, 热带太平洋温暖海水的释放导致大气从地极到赤道的温度梯度增大, 从而使不稳定波动增强. Gambis^[67]指出, 日长的高频分量往往在北半球冬季变化大, 这时, 大气从地极到赤道的温度梯度很大. 而 1982~1983 年 El Niño 事件恰恰发生在北半球晚冬, 本来较大的温度梯度得到进一步加强, 就可能引起日长高频分量的剧变.

Gambis^[67]应用小波变换方法分析 1962~1991 年日长的短周期变化, 认为除了 1982~1983 年

那一次, 在其他的 El Niño 事件期间, 准 50 d 波动并没有增强的趋势. 然而, 钟敏等人^[68]利用 Hilbert 变换解算 1962~1996 年日长亚季节性振荡的振幅变化后得出, 日长亚季节性变化的振幅调制不仅具有线性增大趋势, 而且包含一个超前于 ENSO 的年际变化. 所以, 有必要从多种时间尺度大气振荡的综合效应上研究日长变化与 ENSO 间的关系.

除了日长变化, El Niño 事件还与极移存在一定的联系. Kolaczek 等人^[69]发现, 1980~1998 年期间大气激发函数和观测到的极移激发函数的(20~150 d)短周期变化间的相关性随时间变化, 且存在与南方涛动指数序列类似的 2, 3 和 5 a 的周期. 在 El Niño 事件期间, 大气激发函数和观测到的极移激发函数具有较强的统计相关性, 在 0.05 置信度上通过显著性检验. El Niño 对极移的影响具有明显的脉冲特性, 在该事件期间引起极移的不规则变化. 需要指出的是, 由于极移短周期变化还有来自海洋的贡献, 所以, 进一步的研究中, 必须考虑 El Niño 事件期间海洋的激发效应.

4 展望

由于空间大地测量技术的提高和相应研究工作的开展, 在地球自转运动与大气和海洋活动这个学科交叉领域内已经取得了丰富的成果. 同时, 还有很多基本问题仍未解决, 如: (i) “50 d”波动的机制; (ii) Chandler 摆动的维持问题; (iii) 地球自转运动与大气和海洋活动的非周期高频波动以及它们之间作用的过程如何? (iv) 如何建立全球大气、海洋和固体地球耦合的综合模式, 通过考虑山脉力矩和摩擦力矩的作用, 来揭示地球动力学系统中角动量交换的过程?

以上这些复杂而又富有挑战性的课题, 无疑会吸引人们去探索和深入研究, 并可能成为 21 世纪初期的研究热点之一.

致谢 本工作为国家攀登计划(批准号: 972231003)和国家自然科学基金(批准号: 19833030, 49634140)资助项目.

参 考 文 献

- 1 Lambeck K. The Earth's variable rotation. Cambridge: Cambridge University Press, 1980
- 2 郑大伟, 虞南华. 地球自转及其和地球物理现象的联系: I 日长变化. 地球物理学进展, 1996, 11: 81~104
- 3 Eubanks T M. Variations in the orientation of the earth, contributions of space geodesy to geodynamics: earth dynamics. Washington: AGU Press, 1993
- 4 Liao D C, Greiner-Mai H. A new ΔLOD series in monthly intervals (1892.0~1997.0) and its comparison with other geophysical results. J Geodesy, 1999, 73: 466~477
- 5 Hide R, Dickey J O. Earth's variable rotation. Science, 1991, 253: 629~637
- 6 Morgan P J, King R W, Shapiro I I. Length of day and atmospheric angular momentum: a comparison for 1981~1983. J Geophys Res, 1985, 90: 12645~12652
- 7 Wahr J M, Oort A H. Friction and mountain-torque estimates from global atmospheric data. J Atm Sci, 1984, 41: 190~204
- 8 Rosen R D, Salstein D A. Comment on “a seasonal budget of the earth's axial angular momentum” by Naito and Kikuchi. Geophys Res Lett, 1991, 18: 1925~1926
- 9 Eubanks T M, Steppe J A, Dickey J O, et al. A spectral analysis of the earth's angular momentum budget. J Geophys Res, 1985, 90: 5385~5404
- 10 Dickey J O, Marcus S L, Steppe J A, et al. The earth's angular momentum budget on subseasonal time scales. Science, 1992, 255: 321~324

- 11 郑大伟. 世界时中短周期项的分析. 天文学报, 1978, 19: 103~108
- 12 Feissel M, Gambis D. La mise en evidence de variations rapides de la duree du jour. C R Acad Sc Paris, 1980, 291: 271~273
- 13 Langley R B, King R W, Shapiro I I, et al. Atmospheric angular momentum and the length of day: a common fluctuation with a period near 50 days. Nature, 1981, 294: 730~732
- 14 李志安, Wilson C R. 日长 50 天波动的衰减振荡模型. 天文学报, 1987, 28: 29~38
- 15 Madden R A, Julian P R. Detection of a 40~50 day oscillation in the zonal wind of the tropical pacific. J Atm Sci, 1971, 28: 702~708
- 16 Madden R A. Relationships between changes in the length of day and the 40- to 50-day oscillation in the tropics. J Geophys Res, 1987, 92: 8391~8399
- 17 Ghil M, Kimoto M, Neelin J D. Nonlinear dynamics and predictability in the atmospheric sciences. Rev Geophys, 1991, 29: 46~55
- 18 Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. Bull Amer Meterol Soc, 1996, 77: 437~471
- 19 Yu N H, Zheng D W, Wu H Q. Contribution of new AAM data source to ΔLOD excitation. J Geodesy, 1999, 73: 385~390
- 20 周永宏, 郑大伟, 内藤助夫. JMA GCM 模拟的大气角动量函数 I. 季节性分量. 天文学报, 2000, 41: 68~78
- 21 Merriam J B. Meteorological excitation of the annual polar motion. Geophys J R Astron Soc, 1982, 70: 41~56
- 22 Chao B F, Au A Y. Atmospheric excitation of the earth's annual wobble: 1980~1988. J Geophys Res, 1991, 96: 6577~6582
- 23 King N E, Agnew D C. How large is the retrograde annual wobble? Geophys Res Lett, 1991, 18: 1735~1738
- 24 周永宏, 郑大伟, 虞南华, 等. 大气和海洋对周年极移的激发. 科学通报, 1999, 44(15): 1605~1608
- 25 朱耀仲, 吴 斌, 彭碧波. 地球自转和潮汐参数对地幔滞弹性的约束. 天文学报, 2000, 41: 58~ 61
- 26 Chao B F. On the excitation of the earth's polar motion. Geophys Res Lett, 1985, 12: 526~529
- 27 Munk W H, Hassan E M. Atmospheric excitation of the earth's wobble. Geophys J, 1961, 4: 339~ 358
- 28 Wilson C R, Haubrich R A. Meteorological excitation of the earth's wobble. Geophys J R Astro Soc, 1976, 46: 707~743
- 29 Vondrak J. Atmospheric and groundwater excitation of polar motion in case of variable chandler frequency. Bull Astron Inst Czechosl, 1990, 41: 211~220
- 30 Chao B F. Excitation of earth's polar motion by atmospheric angular momentum variations, 1980~1990. Geophys Res Lett, 1993, 20: 253~256
- 31 Furuya M, Hamano Y, Naito I. Quasi-periodic wind signal as a possible excitation of Chandler wobble. J Geophys Res, 1996, 101: 25537~25546
- 32 Abarca R, Cazenave A. Interannual variations in the Earth's polar motion for 1963~1991: comparison with atmospheric angular momentum over 1980~1991. Geophys Res Lett, 1994, 21: 2361~2364
- 33 Bearnston A G, Livezey R E. Classification , seasonality and persistence of low-frequency atmosphere circulation patterns. Mon Wea Rev, 1987, 115: 1083~1123
- 34 Zhou Y H, Zheng D W, Zhao M, et al. Interannual polar motion with relation to the North Atlantic Oscillation. Global and Planetary Change, 1998, 18: 79~84
- 35 Eubanks T M, Steppe J A, Dickey J O, et al. Causes of rapid motions of the Earth's pole. Nature, 1988, 334: 115~119
- 36 谢伯全, 郑大伟. 大气对地球自转参数(ERP)的高频激发. 天文学报, 1996, 37: 113~123
- 37 Ponte R M. Oceanic excitation of daily to seasonal signals in earth rotation: result from a constant-density numerical model. Geophys J Int, 1997, 130: 469~474
- 38 Brosche P, Wunsch J, Frische A, et al. The seasonal variation of the angular momentum of the oceans. Naturwissenschaften, 1990, 77: 185~186
- 39 Dickey J O, Marcus S L, Johns C M, et al. The oceanic contribution to the earth's seasonal angular momentum budget. Geophys Res Lett, 1993, 20: 2953~2956
- 40 Marcus S L, Chao Y, Dickey J O, et al. Detection and modeling of nontidal oceanic effects on earth's rotation rate. Science,

- 1998, 281: 1656~1659
- 41 Johnson T J, Wilson C R. Oceanic angular momentum variability estimated from the parallel ocean climate model, 1988~1998. *J Geophys Res*, 1999, 104: 25183~25195
- 42 郑大伟, 陈剑利, 华英敏, 等. 地球自转速率对海平面纬向变化影响的初步研究. *天文学报*, 1996, 37: 97~104
- 43 Fu L L, Christensen E, Lefevre M, et al. TOPEX/POSEIDON mission overview. *J Geophys Res*, 1994, 99: 24369
- 44 郑大伟, 吴宏秋. TOPEX 测高仪数据错误的改正及其应用的初步结果. *科学通报*, 1997, 42(10): 1082~1085
- 45 Ponte R M, Stammer D, Marshall J. Oceanic signals in observed motions of the earth's pole of rotation. *Nature*, 1998, 391: 476~479
- 46 Chao B F, O'Connor W P. Global surface-water induced seasonal variations in the earth's rotation and gravitational field. *Geophys J*, 1988, 94: 263~270
- 47 雷小平, 高布锡. 水分布激发与周年极移. *天文学报*, 1992, 33: 61~66
- 48 Wahr J, Molenaar, Bryan F. Time variability of the earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE. *J Geophys Res*, 1998, 103: 30205~30229
- 49 Rasmusson E M. El Niño and variations in climate. *Am Sci*, 1985, 73: 168 ~177
- 50 McPhaden M J. Genesis and evolution of the 1997~1998 El Niño. *Science*, 1999, 283: 950~954
- 51 Trenberth K E. Spatial and temporal variations in the southern oscillation. *Quart J R Meteorol Soc*, 1976, 102: 639~653
- 52 Peixoto J P, Oort A H. *Physics of climate*. New York: American Physics Institute Press, 1993
- 53 Webster P J, Palmer T N. The past and future of El Niño. *Nature*, 1997, 390: 562~564
- 54 Grove R H. Global impact of the 1789~1993 El Niño. *Nature*, 1998, 393: 318~319
- 55 Stefanick M. Interannual atmospheric angular momentum variability 1963~1973 and the southern oscillation. *J Geophys Res*, 1982, 87: 428~432
- 56 Rosen R D, Salstein D A, Eubanks T M, et al. An El Niño signal in atmospheric angular momentum and Earth rotation. *Science*, 1984, 225: 411~414
- 57 Chao B F. Interannual length-of-day variation with relation to the Southern Oscillation/El Niño. *Geophys Res Lett*, 1984, 11: 541~544
- 58 Chao B F. Correlation of interannual length-of-day variation with El Niño/Southern Oscillation, 1972~1986. *J Geophys Res*, 1988, 93: 7709~7715
- 59 Chao B F. Length-of-day variations caused by El Niño-Southern Oscillation and Quasi-Biennial Oscillation. *Science*, 1989, 243: 923 ~925
- 60 郑大伟, 罗时芳, 宋国玄. 地球自转年际变化. El Niño 事件和大气角动量. *中国科学, B 辑*, 1988, (3): 332~337
- 61 宋国玄, 郑大伟, 罗时芳. 地球自转与 ENSO 事件的动力学分析. *天文学报*, 1989, 30: 310~314
- 62 郑大伟, 陈 刚. 赤道带海洋活动与日长变化的关系. *中国科学, A 辑*, 1994, 24(3): 298~302
- 63 刘式适, 刘式达, 傅遵涛, 等. 地球自转与气候动力学——振荡理论. *地球物理学报*, 1999, 42: 590~598
- 64 董晓军, 黄 城, 郑大伟, 等. 利用 TOPEX 卫星测高技术监测 1997 年度 El Niño 过程. *科学通报*, 1998, 43(19): 2062~2065
- 65 Eubanks T M, Steppe J A, Dickey J O. *The El Niño, the southern oscillation and the earth rotation, earth rotation: solved and unsolved problems*. Boston: Reidel Publishing Company, 1986
- 66 Zheng D W, Song G X, Luo S F. El Niño prediction. *Nature*, 1990, 348: 119
- 67 Gambis D. Wavelet transform analysis of the length of the day and the El Niño/Southern Oscillation variations at intraseasonal and interannual time scales. *Ann Geophysicae*, 1992, 10: 429 ~437
- 68 钟 敏, 朱耀仲, 高布锡. 日长亚季节变化的振幅调制与厄尔尼诺现象. *天文学报*, 1999, 40: 101~106
- 69 Kolaczek B, Nuzhdina M, Nastula J, et al. El Niño impact on atmospheric polar motion excitation. *J Geophys Res*, 2000, 105: 3081~3087

(2000-05-22 收稿, 2000-09-05 收修改稿)