

地球自转与大气、海洋活动

郑大伟

(中国科学院上海天文台)

提 要

本文叙述了地球自转、大气角动量和热带海洋、大气活动的研究进展。讨论了地球自转年际变化与 El Nino 事件的关系。

一、引 言

假若地球是一个均匀的球体,而不受外力作用,它将绕轴作等速的自转运动。然而,地球所处的宇宙环境和它本身结构的不均匀性,导致地球自转产生十分复杂的变化。现有研究表明,地球自转变化中一部分是理论上可预测的,例如地球自转轴相对于空间惯性参考系的岁差和章动运动等,它们与太阳、月亮和行星对地球的引力有关。另一部分是不可预测的变化,这些变化主要与大气、海洋的活动和地球内部的结构,以及它们之间能量的交换有关。

随着天文、气象和海洋的现代观测技术的发展,使地球自转变化的研究与气象学、海洋学相联系,并已取得一些研究成果。近些年来,在海洋、大气领域里广泛开展的 El Nino 事件的研究热潮,更进一步促进了地球自转变化与热带海、气活动的联系,已逐步成为当前地球自转研究领域的一个前沿课题。为此,本文将介绍和评述目前国际上地球自转的测定和研究、大气角动量、热带海、气活动,以及它们之间有关研究工作的进展。

二、地球自转速率变化

1. 日长变化

天文观测和近代大地测量技术测量出地球相对于空间天体的准惯性参考系的指向变化,即地球轴指向和轴的旋转角变化。地球指向变化包括岁差、章动和表征自转轴在地球表面的小量运动,即地极移动。自转轴的旋转角描述着世界时 UT_1 ,采用 UT_1 的测量结果可以推得地球自转速率变化。

地球自转轴向速率变化常用日长的变化表示,并由下式简单描述。

$$\frac{\Delta LOD}{86400s} \approx \frac{-\Delta\omega}{\omega_0} \quad (1)$$

式中, ΔLOD 为日长的变化量; ω_0 是地球平均自转角速度, 通常取值为 $72.921 \mu\text{Rad/s}$; $\Delta\omega$ 为地球自转角速度的变化量。由上式可知, 地球自转速率变化与日长变化成反向关系。

日长变化 ΔLOD 可用世界时 UT_1 的测量求得, 但需要一个比地球本身还要稳定的钟作参考, 即由世界时 UT_1 与稳定的原子时 AT 之差的时间微分求得, 可表示为

$$\Delta LOD(t) = \frac{(UT_1 - AT)(t) - (UT_1 - AT)(t + \Delta t)}{\Delta t} \quad (2)$$

式中 Δt 为相邻两次 UT_1 测定值的时间间隔。

2. 地球自转的测定

从原理上说地球自转参数 (UT_1 和极移) 的测量可分为两大类: 一类是几何学测量, 如天文光学观测和甚长基线干涉 (VLBI) 测量; 另一类是动力学测量, 如激光月亮测距 (LLR) 和人卫激光测距 (SLR)。这些测量又分别依赖于不同的参考系统, 天文光学观测依赖于恒星星表组成的恒星参考系, VLBI 依赖于河外射电源构成的射电源参考系, LLR 和 SLR 分别依赖于月球和人卫轨道运动构成的动力学参考系。

用天文光学仪器观测恒星来测定世界时 UT_1 已具有较长的历史。1955 年高稳定度原子钟的出现以及自 1962 年起采用了恒星位置较准确的 FK₄ 星表, 使天文光学测量的精度有较大的提高。目前, 每五天 UT_1 的测定精度约在 $\pm 1\text{ms}$ 左右[1]。

激光测月是由地面观测站发射激光光束, 经月球上的反射器返回地面, 记录激光发射时刻和地面站接收时刻, 可测得地面站到月球的距离, 并由此归算出世界时 UT_1 。从 1970 年起在美国 Texas 的 McDonald 天文台开始常规的 LLR 观测, 并提供 UT_1 的时间序列, 其典型的测定精度约为 $\pm 0.5\text{ms}$ [2]。类似的技术 SLR 于 1976 年开始提供地球自转参数[3]。

1978 年在美国组网 (POLARIS 计划) 开始定期用 VLBI 技术测定世界时 UT_1 和地极移动。在国际地球自转联测 (MERIT) 的促进下, 1984 年美国的 POLARIS 网发展为国际射电干涉观测网 (IRIS), 并开始提供每五天高精度的地球自转参数时间序列, 其 UT_1 的测定精度为 $\pm 0.1\text{ms}$ [4]。

我国上海天文台从 1959 年开始用天文光学观测测定世界时 UT_1 , 其测定精度已达到国际先进水平[5]。自七十年代中期开始研制 SLR 和 VLBI 技术, 先后获得成功, 并参加了测定地球自转参数的国际合作。上海天文台已开始独立用 VLBI、LLR 和 SLR 观测资料归算地球自转参数[6-8]。

3. 地球自转变化

地球自转运动是一种十分复杂的物理运动过程。在空间尺度上, 它受宇宙空间, 地球表层和地球内部等多种物理因素的影响。在时间尺度上, 地球自转速率包含着几天到地质年代时间跨度的变化。

在地球外层, 作用于地球自转的主要是太阳、月亮和行星等天体的运动, 它们对地球自转的影响呈现为周期性的变化, 如岁差、章动和潮汐效应等; 在地球表层, 主要受大气、海洋活动以及地球表面冰雪融化的作用, 它们对地球自转的影响有的为准周期性, 有的是非周期的, 如受大气激发的季节性变化和高频波动。在地球内部, 地核、地幔和地壳的相对运动也

对地球自转产生影响,如核幔耦合作用所引起的地球自转变化的十年起伏。

图 1 和图 2 绘出了历史上和近期的日长变化。它们分别显示了地球自转速率长时间尺度和短时间尺度的变化情况。

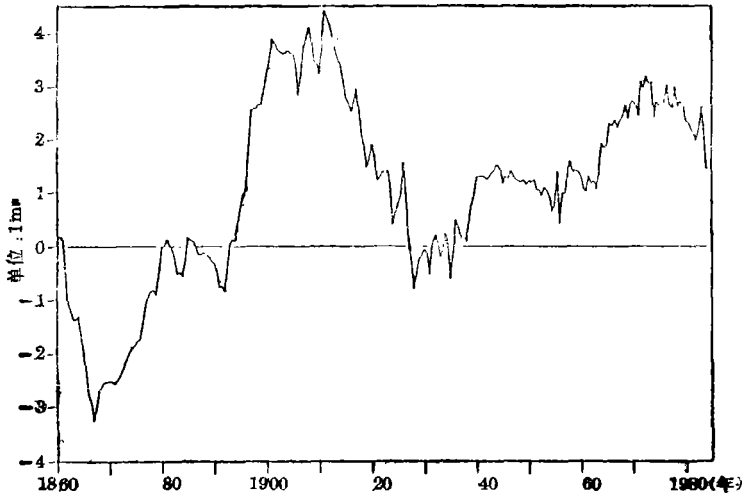


图 1. 历史上的日长变化观测资料。

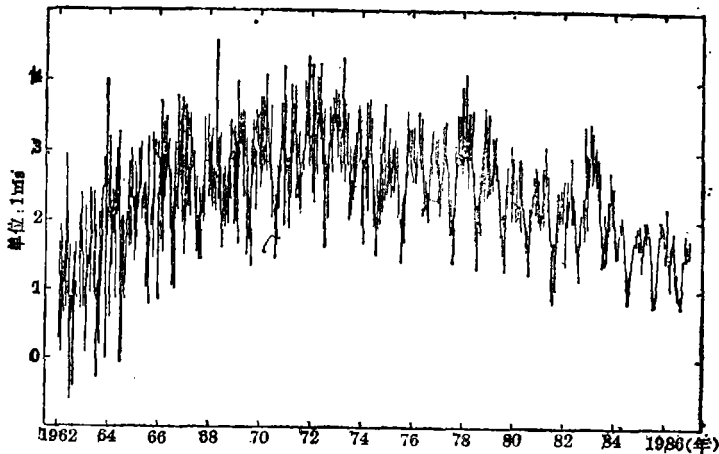


图 2. 近期的日长变化观测资料。

根据已有的研究,地球自转速率的主要变化及其物理原因的解释概括于表 I 中。

表 1 地球自转速率变化及其机制

时 间 尺 度	主要的物理机制解释
长期缓慢变化	潮汐摩擦引起的地球自转长期减速 ^[9] 。
长周期变化(大于 10 年)	主要与太阳、月亮和行星运动有关 ^[10] 。
十年起伏	主要与地球内部核、幔间的耦合效应有关 ^[9] 。
两年准周期变化	大气平流层的准两年振荡作用 ^[9] 。
周年和半年变化	大气的季节性作用, 太阳、月亮的半年潮汐效应 ^[9] 。
短周期变化(小于半年)	大气的高频振荡和月亮的短周期潮汐波动效应 ^{[11], [12]} 。

三、大气角动量

1. 大气角动量的估计

大气环流的变异引起大气角动量(AAM)的变化, 大气角动量与固体地球角动量的转换和总角动量的守恒使地球自转速率产生相反的变化。由(1)式可知, 这也使日长相应出现成比例的变化。

1976年7月起, 美国国家气象中心(NMC)和欧洲中期天气预报中心(ECMWF)已开始常规天气预报中采用大气模型定期提供大气角动量每天两个值的估计资料。它们是由最新的全球气象资料和上一次的预报估计, 综合得到一系列网格点上的大气模型参数即风和气压的数据。然后, 对全球网格点上的风和气压积分, 可求得大气角动量序列^{[13], [14]}。

全部大气角动量是由三个分量来描述, 并用 M_3 表示与地球自转速率变化有关的轴向 AAM 分量。对于一阶项, 由下面公式分别对风和气压积分估计轴向大气角动量。

$$M_3(W) = \frac{2\pi R^3}{g} \int_{50\text{mbar}}^{1000\text{mbar}} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} [u] \cos^2 \phi \, d\phi \, d\rho \quad (3)$$

$$M_3(P) = \frac{0.70R^4}{g} \int_0^{\pi/2} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} P_s \cos^3 \phi \, d\phi \, d\theta \quad (4)$$

式中, R 是地球的平均半径; P 是气压; P_s 是地方表面气压; g 是重力加速度(设为常数); $[u]$ 是带平均的向东风速; ϕ 和 θ 分别是纬度和东经度。数值因子 0.70 是考虑到对大气负载响应的地球补偿形变^[14]。 M_3 是以角动量为量纲, 采用 $1.668 \times 10^{-20} \text{s}^2/\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 转换常数, 可以化算为日长(LOD)的量纲^[15]。

2. LOD 和 AAM 的变化

日长 LOD 中的季节性变化和不可预测的高频变化主要是受大气和固体地球之间轴向角动量的交换所激励, 大气轴向角动量的变化可区分为加热受迫的季节性振荡, 短期的和较长期的自由振荡。所有这些变化, 主要是受带风速度的作用。Morgan 等人的定量分析表明, 对于大气轴向角动量变化的贡献, 在季节性分量上, 气压的作用仅占带风的 10%, 在更高的频率上也约占 25%^[16]。

图3给出了由 VLBI、SLR 技术测得的 LOD 变化和 NMC 用全球气象资料所归算的轴向 AAM 序列。从图中可见,大气角动量几乎可以解释 LOD 中全部的季节性变化,在较短的时间尺度上 AAM 与 LOD 的变化也符合得比较好。地球自转变化中受大气高频激发所产生的 50 天波动现象已先后被一些工作所证实[11],[17]。实际上,其激发周期随时间约在 30—70 天的范围内呈现为无规律的变化[15],[16]。罗时芳等人[18]和 Merriam 的工作[19]证实,大气对地球自转速率变化,还存在着更高频率(一个月以内的时间尺度)的激发作用。他们分别用 VLBI 观测资料和天文测时资料分析世界时 UT₁ 中的短周期潮汐波动时,各自发现作带风效应改正后,地球弹性参数 Love 数 K 的估计值都会相应减小。

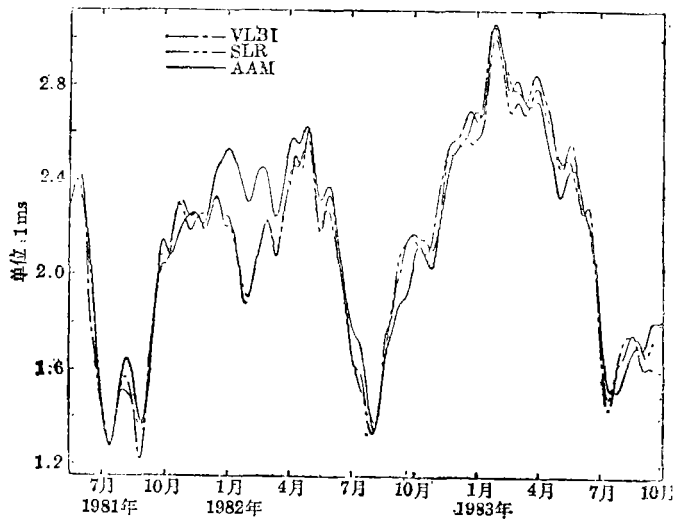


图3. LOD 和 AAM 变化的时间序列。

现有研究表明,大气不可能在几十年或更长的时间尺度上对地球自转变化产生影响[20]。虽然,大气对地球自转年际波动的作用尚有争议[20-21],由于它涉及与海、气相互作用有关的 El Nino 事件,而成为当前国际上地球自转研究领域中的一个活跃的前沿课题。我们将在下面作详细的叙述。

四、热带大气、海洋活动

热带,约占地球面积的二分之一,大部份为海洋,接收太阳辐射能最多。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。

1. El Nino 事件

El Nino 事件反映着热带大气和海洋的相互作用过程。它的基本特征是在南美太平洋沿岸(主要是厄瓜多尔和秘鲁)的海水表面温度出现异常的增暖[23],El Nino 事件的活动期通常要达一年以上。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。秘鲁一带海域海面水温大多在 20°C 以下。其原因是:秘鲁寒流沿南美大陆西侧北上,其中一部份变

成南赤道海流向西移动;沿低纬海域的向西的信风使赤道附近的暖水向太平洋西侧积聚;相随着信风,下层冷海水在赤道涌升。在某些年份,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,并在东太平洋积聚。这时,从南美沿海到太平洋东部赤道海域,海面水温高于常年(有时比常年可上升 $5-6^{\circ}\text{C}$),出现 El Nino 事件[24],[25]。

大量的研究工作已经表明,El Nino 事件与热带大气环流中的南方涛动有密切联系[26],也有人认为与热带海洋洋流活动有关[27]。至于形成 El Nino 事件的真实物理机制至今还未取得一致的结论[22],[28],[29]。

自六十年代以来,共发生了 7 次 El Nino 事件,发生的年份依次是 1963、1965、1969、1972、1976、1982—83 以及最近的一次 1986—87 年。其中 1972 年和 1982—83 年的两次是最强的 El Nino 事件。每两次 El Nino 事件之间的时间间隔约在 2—7 年之间。这种年际时间尺度非周期性的太平洋海表面温度变化,是 El Nino 事件的一个重要特性[27]。

El Nino 事件时期,不仅给南美的渔业带来巨大损失,还会出现全球大尺度的气候异常活动。仅以 1982—83 年的那次强 El Nino 事件为例,已酿成几十亿美元的经济损失,有一千多人丧生,我国也出现南涝北旱的灾情。因此,研究 El Nino 事件的成因和预测 El Nino 事件的发生,不仅具有科学意义,还是一个具有重要应用价值的课题。

2. 南方涛动

热带大气环流年际变化最突出的也是最重要的一种现象是南方涛动(Southern Oscillation)。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[30]。

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的海水温暖区域上升,升至高空的空气返流回东太平洋,并在海水低温区下沉,这样,太平洋赤道带上空的气流在整体上形成了一个东西环流,即是著名的 Walker 环流[31]。这种状态并不是永恒不变。每隔数年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。在东、西太平洋的气压出现这种宛如跷跷板的上下振动现象被称之为南方涛动。

通常采用塔希堤($148^{\circ}05' \text{W}$, $17^{\circ}53' \text{S}$)与达尔文港($130^{\circ}59' \text{E}$, $12^{\circ}20' \text{S}$)两地的海平面气压差的距平值显示南方涛动的特征,这个距平值称为南方涛动指数,并记为 SOI[32]。

显然,当 SOI 高时,赤道太平洋上偏东信风较强。SOI 低时,偏东信风减弱,有时甚至出现西风[26]。这时,就会在南美洲西岸出现海面水温异常增暖的 El Nino 事件。正由于 El Nino 事件与南方涛动之间存在着高显著的凝聚性,故亦称为 ENSO 事件。但是,根据时滞相关分析表明,El Nino 事件的发生要迟后于 SOI 的变化约 2—3 个月[23],[33],也就是说 El Nino 事件的发生是海洋对大气环流异常的响应[28]。

3. 热带海洋活动

南方涛动的过程中伴随着在太平洋赤道带出现年际的海洋异常活动。Wyrtki 首先提出和描述了太平洋洋流东、西向移动的模式(见图 4)[27],并得到实测资料的证实[27],[34]。

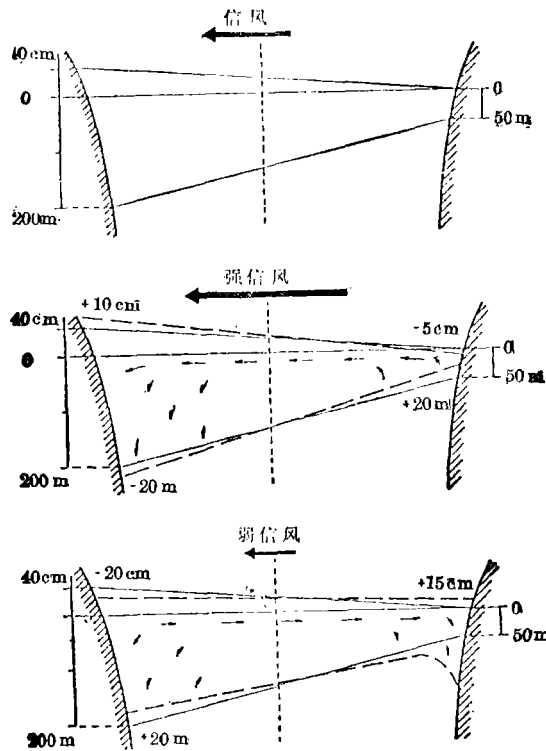


图 4. 赤道太平洋洋流活动模式。

从这一模式可见,在南方涛动的过程中,当 SOI 高时,赤道带信风加强,使太平洋的表层洋流自东向西流动,最终造成西太平洋区域的海平面相对于东太平洋的海平面有所升高,并在西太平洋积聚暖水。当 SOI 低时,赤道带信风减弱,相对来说西风加强,太平洋的表层洋流的向西流动也减弱,随着时间的推移,洋流开始向东流动,使东太平洋区域的海平面逐渐升高,并在东太平洋积聚暖水,出现 El Nino 事件。1985年 Wyrтки 曾根据海平面观测资料分析了 1982—83 年 El Nino 事件时期的洋流运动情况,发现在 El Nino 事件盛期的前夕,太平洋赤道带具有流量为 $40 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ 的向东洋流活动[34]。这个定量结果表明,热带洋流活动不仅与南方涛动有关,我们还认为发生在赤道东、西太平洋之间如此量级的洋流异常活动,将会对地球自转速率变化产生影响。

图 6 给出了 1949 年到 1978 年期间,太平洋赤道区域风应力、海平面变化、南方涛动指数和海水表面温度(反向)的时间序列,以表征和概括在热带大气和海洋活动中有关物理参数的变化过程。

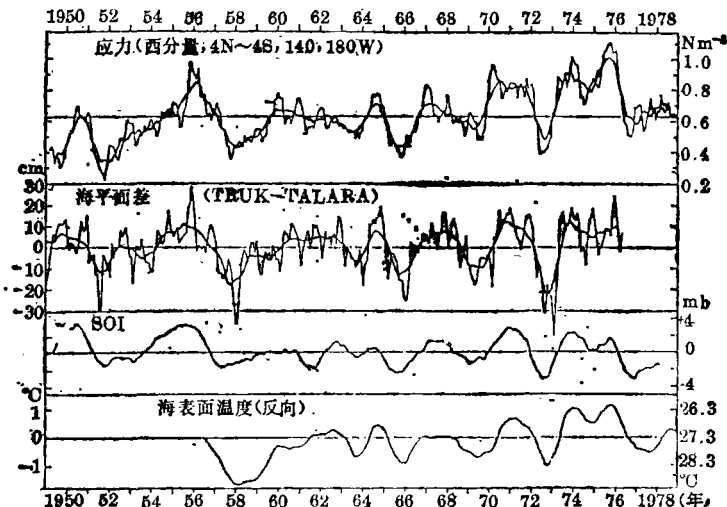


图 5. 热带海洋-大气系统中有关物理参量的时间序列(1949—1978年)。

五、海、气相互作用与地球自转年际变化

如上所述,热带海洋、大气相互作用的一个主要特征是 El Nino 事件,它反映着太平洋赤道带大区域里空气质量和海洋洋流的异常活动。由于地球绕轴自转运动在赤道上线速度最大,因此,热带大气、海洋的相互作用过程,必然会在地球自转速率变化或日长变化中有所反映。自 1982—83 年那次强 El Nino 事件发生后,不少学者从事着地球自转与 El Nino 事件有关的研究工作 [20-22,35-40]。我们从表 1 可知,几年时间尺度的年际变化正是以前地球自转研究中较少注意的时间尺度。因此,开展地球自转与 El Nino 事件有关课题的研究,不仅具有大气、海洋和固体地球多学科交叉的科学意义,还会导致地球自转基础理论研究的新发展。

1. 日长的年际变化与 El Nino 事件

文[39]综合了近廿五年(1962.0—1987.0)的 UT_1 观测资料,这些资料均相对于 IAU 1980 的章动系统[41],并按 Yoder 等人的理论公式扣除了所有的带谐潮汐变化[42],由公式(2)得到日长变化 ΔLOD 的时间序列。为了消除 ΔLOD 中其他物理因素的影响(见表 1),保留年际信号量,采用了窄带截断效应的多级数字滤波方法[42],在 El Nino 事件的频带范围(对应于 2—7 年的周期)内对 ΔLOD 序列作带通数字滤波。滤波后的结果绘于图 6 的上部。表征 El Nino 现象的东太平洋赤道带(180°—80°W, 5°S—5°N)的海面水温的月距平曲线绘于图 6 的下部。

滤波后的 ΔLOD 曲线表明,在地球自转速率变化中,也存在着几年时间尺度、非准周期性的年际波动。由图 6 可见,地球自转的年际变化与东太平洋赤道带海面水温变化存在着相当好的一致性。这个结果表明,在赤道带海温增暖时期(亦称 El Nino 事件形成时期),地

球自转年际速率减慢;海温减暖时期(亦称非 El Nino 事件时期),地球自转年际速率加快。也就是说,每次 El Nino 事件几乎都是出现在地球自转年际变化由加速变为减慢之后。

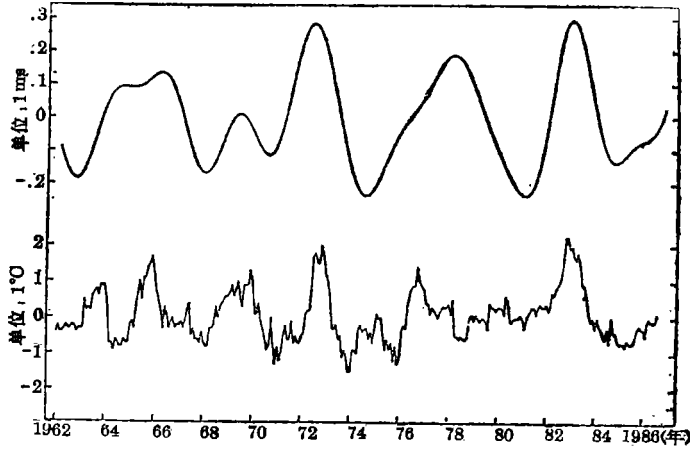


图 6. Δ LOD 的年际变化(上部)和东太平洋赤道带海面水温变化(下部)。

Δ LOD 的年际变化的幅值与 El Nino 事件的强弱有关。对于 1982—83 年的强 El Nino 事件而言,日长增长近 0.3ms,日长的相对变化为 3.4×10^{-9} ,相对于地球自转的速率产生了 $-2.5 \times 10^{-7} \mu\text{Rad/s}$ 的变化。

2. 日长和大气角动量的年际变化

如前所叙,许多研究工作已证实 El Nino 事件与信风的异常有关。文[39]就采用了美国国家气象中心(NMC)的全球带风气象资料,由(3)式计算了大气角动量 AAM,并转换到日长变化上。按归算日长年际变化的相同带通滤波过程,求得 AAM 的年际变化序列。由于 AAM 的资料开始于 1976 年下半年,因此仅能与 Δ LOD 资料中 1982—83 年间的那次较强的年际变化进行比较。图 7 绘出了这段时期 Δ LOD 和 AAM 的两个年际变化序列。

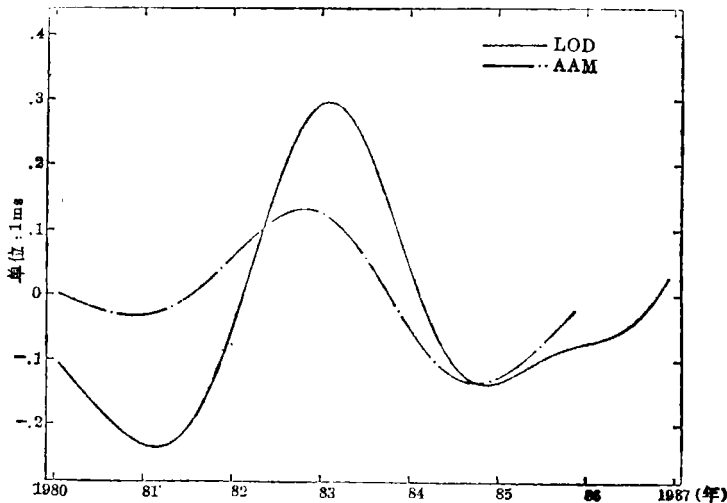


图 7. Δ LOD 和 AAM 的年际变化序列。

从图可见,虽然 AAM 和 ΔLOD 的年际变化规律基本一致,但 AAM 的年际变化存在着超前约 2—3 个月的现象。这个迹象表明大气环流不仅对地球自转的季节性变化和高频变化有激发作用,对于几年时间尺度的年际变化也是有贡献的。比较两个序列的幅值可知, AAM 年际变化并不能解释 ΔLOD 年际变化的全部过程,还可能存在其他的激发源。

文^[39]还分析了同一时期的赤道海面水温序列的年际变化,发现 AAM 年际变化也存在超前现象,从而得出地球自转年际变化和 El Nino 事件分别是固体地球和海洋各自对大气环流变异的响应的结论。

3. 大气、海洋的动力学效应

文^[40]将地球、大气和海洋作为一个孤立系统,分析了 1982—83 年 El Nino 事件时期大气和海洋活动对地球自转年际速率变化的动力学效应,并获得定量估计的初步结果。

若把固体地球、大气和海洋置于封闭的动力学系统中,其角动量守恒

$$G_e + G_a + G_o = \text{常数} \quad (5)$$

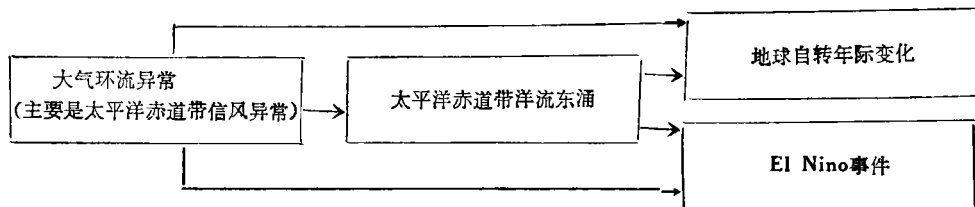
它们之间的角动量变化应满足

$$\Delta G_e + \Delta G_a + \Delta G_o = 0 \quad (6)$$

上两式中, G_e 、 ΔG_e ; G_a 、 ΔG_a 和 G_o 、 ΔG_o 分别是固体地球、大气和海洋的角动量及其变化。

Sadler 等人的工作发现,1982—83 年 El Nino 事件开始至 1982 年底在太平洋赤道带出现异常的低层西风,其风速达 10—15m/s^[43]。如前所述, Wyrski 根据海平面观测资料估计,发现洋流在这一时期也出现流量为 $40 \times 10^6 \text{m}^3/\text{s}$ 的自西向东流动^[34]。这些工作说明在这一时期大气和海洋都得到一个与地球自转同向的角动量的增加量,根据角动量守恒原理,大气和海洋角动量的增加只能以固体地球自转角动量的减少来补偿。由此,文^[40]得到 1982—83 年 El Nino 事件时期大气和海洋异常活动引起地球自转速率变化的动力学定量分析结果为 $\Delta \omega_e = -2.06 \times 10^{-13}/\text{s}$ 。

与日长变化 ΔLOD 资料分析得到的 $-2.5 \times 10^{-13}/\text{s}$ 结果相比较,动力学效应定量估计的符合度为 80%。资料分析和理论模型估计的一致性,使他们提出了一种热带大气、海洋活动与地球自转年际变化和 El Nino 事件之间的物理过程,并由下述框图描叙。



六、几点讨论

本文所介绍的工作已经表明,天文观测和近代空间大地测量技术已能检测到热带海洋、大气相互作用所引起的地球自转的年际变化信号,地球自转与 El Nino 事件有关的研究课

题已受到天文和地球物理学者的重视,近些年来已发表不少有价值的文章[20-22,35-40]。可是,这些文章中的一些相互不同的学术观点表明还有待继续深入的研究。为此,作者提出以下几点粗浅的看法和讨论。

地球自转运动受多种物理因素的影响和制约,人们只有从地球自转资料中较严格地消除各种非 El Nino 事件因素的瞬时效应(而不是平均效应),才能较真实地揭示和研究地球自转与 El Nino 事件的关系,并得到有关的定量结果。我们认为目前较有效的资料分析方法是数字滤波[39],[44]。对于非准周期现象,显然采用谱分析方法是不适宜的。

对于地球自转年际变化的激发机因还存在着不同的争议。Rosen 等人认为大气中风的异常引起了日长的全部年际变化[21], Eubanks 等人的工作却指出大气角动量的资料不可能解释全部日长的年际变化,他们认为剩余部分可能是天气预报的模型误差,或存在着角动量的其他激发源[20]。我们的工作证实了 Eubanks 等人的观点,并提出洋流的异常活动是地球自转年际变化的另一个激发源[40]。此外,任振球等人认为地球自转大幅度持续减慢可能是形成 El Nino 事件的主要因子[22]。

El Nino 事件时期,出现全球性的气候异常,生态平衡受到严重影响。因此,研究用地球自转资料预测 El Nino 事件发生是一个有重要实际意义的工作。文[39]初步探讨了用天文测时资料归算和监视日长年际变化的极小值来预测 El Nino 事件的可能性。

古代月掩星和日、月蚀等天文观测资料,提供了过去二千多年的日长变化数据[45],[46]。具有一定精度的日长变化数据也有二百多年的序列[47],[48]。用这些资料来反演历史上的大气和海洋事件,将会成为研究地球自转与大气、海洋活动的一项重要工作。

参 考 文 献

- [1] Feissel, M., *Bull. Geod.*, **54** (1980), 81.
- [2] Dickey, J. O., Newhall, X. X. and Williams, J. G., *BIH Annual Report for 1984*, D69 (1985).
- [3] Tapley, B. D., Schutz, B. E. and Eanes, R. J., *J. Geophys. Res.*, **90** (1985), 9235.
- [4] Carter, W. E., Robertson, D. S. and Mackay, J. R., *J. Geophys. Res.*, **90** (1985), 4577.
- [5] 上海天文台第一研究室, *天文学报*, **18** (1977), No. 1, 4.
- [6] Luo, S. F. and Wang, S. H., *Proc. Inter. Conf. Earth Rotation and Terrestrial Reference Frame*, Vol. 1, 351, Ohio State University, Columbus, (1985).
- [7] 金文敬, 王强国, *天文学报*, **27** (1986), No. 2, 85.
- [8] 黄斌, 何妙福, 冯初刚, 朱圣源, *中国科学, A 辑* (1986), No. 6, 629.
- [9] Lambeck, K., *The Earth's Variable Rotation*, Cambridge University Press., New York (1980).
- [10] 罗时芳等, *天文学报*, **15** (1974), No. 1, 79.
- [11] Feissel, M., Rosen, R. D. and Salstein, D. A., *BIH Annual Report for 1981*, D79 (1982).
- [12] Yoder, C. F., Williams, J. G. and Parke, M. E., *J. Geophys. Res.*, **86** (1981), 881.
- [13] Rosen, R. D. and Salstein D. A., *J. Geophys. Res.*, **88** (1983), 5451.
- [14] Barnes, R. T. H., Hide, R., White, A. A. and Wilson, C. A., *Proc. Roy. Soc. London, Series A*, **387** (1983) 31.
- [15] Eubanks, T. M., Steppe, J. A., Dickey, J. O. and Callahan, P. S., *J. Geophys. Res.*, **90** (1985), 5385.
- [16] Morgan, P. J., King, R. W. and Shapiro, I. I., *J. Geophys. Res.*, **90** (1985), 12645.
- [17] 郑大伟, *天文学报*, **19** (1978), No. 1, 103.

- [18] Luo, S. F., Zheng, D. W., Robertson, D. S. and Carter, W. E., *J. Geophys. Res.*, **92** (1987), 11657.
- [19] Merriam, J. B., *J. Geophys. Res.*, **89** (1984), 10109.
- [20] Eubanks, T. M., Steppe, J. A. and Dickey, J. O., in *Earth Rotation: Solved and Unsolved Problems*, 163, D. Reidel Publishing Company, (1986).
- [21] Rosen, R. D., Salstein, D. A., Eubanks, T. M., Dickey, J. O. and Steppe, J. A., *Science*, **225** (1984), 411.
- [22] 任振球, 张素琴, 科学通报, (1985), No. 6444.
- [23] Rasmusson, E. M. and Carpenter, T. H., *Mon. Wea. Rev.*, **110** (1982), 354.
- [24] 长坂昂一, 气象(日), 1983, 7, 9.
- [25] 长坂昂一, 气象(日), 1983, 9, 3.
- [26] Rasmusson, E. M. and Wallace, J. M., *Science*, **222** (1983), 1195.
- [27] Wyrki, K., *Marine Techn. Soc. J.*, **16** (1982), 3.
- [28] Wyrki, K., *Jour. Phys. Oceanography*, **5** (1975), 572.
- [29] 陈烈庭, 气象学报, **41** (1983), 3.
- [30] Bjerknes, J., *Mon. Wea. Rev.*, **97** (1969), 163.
- [31] Walker, G. T., and Bliss, E. W., *Memoirs Roy. Meteor. Soc.*, **4** (1932), No. 36, 53.
- [32] Chen, W. Y., *Mon. Wea. Rev.*, **110** (1982), 800.
- [33] 陈烈庭, *Advances in Atmos. Sci.*, **2** (1985), 542.
- [34] Wyrki, K., *J. Geophys. Res.*, **90** (1985), 7129.
- [35] Stephanic, M., *J. Geophys. Res.*, **87** (1982), 428.
- [36] Carter, W. E., Robertson, D. S., Pettey, J. E., Tapley, B. D., Schutz, B. E., Eanes, R. J. and Lufeng, M., *Science*, **224** (1984), 957.
- [37] Chao, B. F., *Geophys. Res. Lett.*, **11** (1984), 541.
- [38] 朱圣源, 中国科学院上海天文台年刊, **7** (1985), 8.
- [39] 郑大伟, 罗时芳, 宋国玄, 中国科学, B辑(1988), 3, 332.
- [40] 郑大伟, 宋国玄, 罗时芳, 亚太会议(IAU)论文集(1987).
- [41] Sedelmann, P. K., *Celestial Mechanics*, **27** (1982), 79.
- [42] 郑大伟, 董大南, 天文学报, **27** (1986), No. 4, 368.
- [43] Salder, J. C. and Kilonsky, B. J., in *Trop. Ocean-Atmos. Newslett.*, 3 October, 1983.
- [44] Salstein, D. A. and Rosen, R. D., *J. Climate and Applied Meteo.*, **25** (1986), No. 12, 1870.
- [45] 李致森, 中国科学, A辑(1985), No. 2, 163.
- [46] Morrison, L. V. and Stephenson, F. R., *Earth Rotation: Solved and Unsolved Problems*, 69, D. Reidel Publishing Company, (1986).
- [47] Stephenson, F. R. and Morrison, L. V., *Phil. Trans. Roy. Soc.* **A313** (1984), 47.
- [48] McCarthy, D. D. and Babcock, A. K., *Phys. Earth and Planet. Inter.*, (1986).

(责任编辑 林一梅)

Earth Rotation and the Activities of Ocean and Atmosphere

Zheng Dawei

(*Shanghai Observatory, Academia Sinica*)

Abstract

A description of recent progress on the studies of Earth rotation, atmospheric angular momentum as well as the atmospheric and oceanic activities in the tropical region, is given in the paper. A discussion on the relation between inter-annual variation of Earth rotation and El Nino events is also made.