

地球自转变化中的太阳物理效应

林 元 章

(中国科学院北京天文台 北京 100080)

摘 要

对太阳活动和太阳风影响地球自转的研究现状作了评述。首先介绍地球自转变化的表示和测定方法、引起地球自转变化的各种扰动源以及自转长期变化中的潮汐效应和非潮汐效应。然后对地球自转变化中的太阳活动周期调制、太阳耀斑可能引起地球自转突然减速以及太阳风能否影响地球自转等问题的国内外研究现状和结果,分别作了评论性阐述。最后作了简要总结。

关键词 地球 — 太阳: 活动 — 太阳: 耀斑 — 太阳风 — 日地关系

1 地球自转变化概述

1.1 地球自转变化的表示和测定

由于受到来自外界和地球内部的种种干扰,地球的自转状态并非恒定。精密测量表明,地球自转轴在空间的指向和绕自转轴转动的角速度,均有微小变化。自转轴指向的变化表现为自转轴与地球表面交点(地极)的位置不断移动,称为极移。而自转角速度的变化,则表现为地球自转一周所需要的时间,即所谓“日长”(length of a day,简记为 l.o.d. 或 LOD)并非固定,而是随时间变化。本文中暂不涉及极移,限于讨论地球自转速率的变化。

通常用实测的 LOD 与 LOD 的标称值 $l_0(86400s)$ 之差来表示 LOD 的变化,即

$$\Delta LOD = LOD - l_0 \quad (1)$$

ΔLOD 与地球自转角速度的变化 $\Delta\omega$ 存在近似关系

$$\frac{\Delta LOD}{l_0} \approx -\frac{\Delta\omega}{\omega_0} \quad (2)$$

其中 $\omega_0 = 72.921\mu\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 为地球自转平均角速度。上式右端负号表明自转加快时,日长缩短;自转减慢时,日长增大。精确测定经极移改正后的世界时 UT_1 , 再与稳定的原子时 AT 比较,就可按下列公式求得日长变化 ΔLOD 。其微分和离散公式分别为

$$\Delta\text{LOD} = \frac{d(\text{UT}_1 - \text{AT})}{dt} \tag{3}$$

$$\Delta\text{LOD}(t) = [(\text{UT}_1 - \text{AT})_t - (\text{UT}_1 - \text{AT})_{t+\Delta t}] / \Delta t \tag{4}$$

其中 Δt 为相邻两次测定 UT_1 的时间间隔。由于现代原子钟的稳定性非常高 (优于 10^{-13})，因此 ΔLOD 的测定精度仅取决于 UT_1 的测量精度。在本世纪 60 年代，用经典天文光学方法 (以恒星为参考系) 测得的精度已能达到 $\pm 1\text{ms}$ ；70 年代，利用激光测月和人卫激光测距法 (它们分别基于以月球和人造卫星轨道运动构成的动力学参考系) 的测量精度为 $\pm 0.5\text{ms}$ ；而到 80 年代，利用国际射电干涉观测网 (以河外射电源为参考系) 则可达到 $\pm 0.1\text{ms}$ 的测量精度。至于近代天文观测之前的 LOD 资料，则可利用历史上的日月交食和掩星记录进行推算^[1,2]。

有时也用自规定的标准时刻 (历元) 至某一时刻的世界时 UT 与历书时 ET 的差值

$$\Delta T = \text{ET} - \text{UT} \tag{5}$$

来表示地球自转变化。而且通常规定以 1900 年 1 月 0 日格林尼治平正午为标准时刻，于是某时刻的 ΔT 即指从此时刻至标准时刻之间所积累的 UT 与 ET 之差。

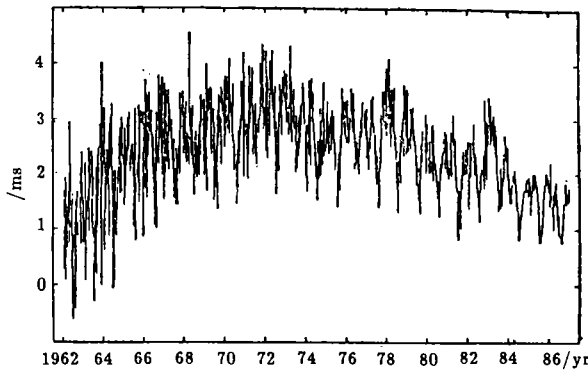


图 1 LOD 的短期变化^[3]

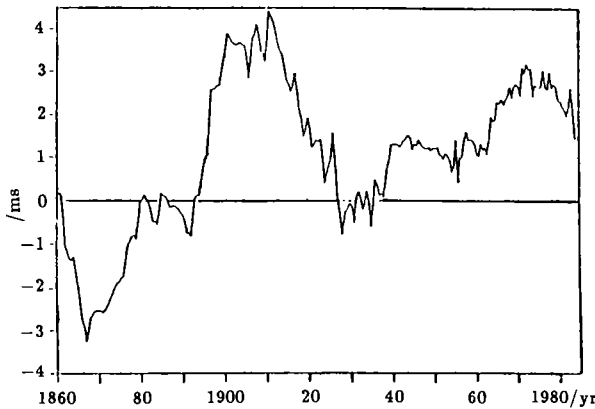


图 2 LOD 的长期变化^[3]

图 1 和图 2 分别为日长的短期变化和长期变化^[3]。图 3 则是由历史上的日月食记录和近代天文观测综合推测的 ΔT 平滑值的超长期变化^[4]。

1.2 引起地球自转变化的扰动源

由图 1 和图 2 可见, 日长变化的形式非常复杂。众多研究者采用不同的滤波方法和频谱分析方法对其仔细研究之后, 认为日长变化中包含着时标从几天至千年的各种周期、准周期和不规则起伏, 以及长期性的单向变化。已经提出的引起地球自转变化的扰动源, 如表 1 所示^[3]。

表 1 引起地球自转变化的主要扰动源

时 标	可能的扰动源
1. 短周期变化 (小于半年)	大气高频振动和月球短周期潮汐效应
2. 周年和半年变化	大气的季节变化, 太阳和月球的半年潮汐效应
3. 两年准周期变化	大气平流层风的准两年振荡
4. 十年起伏	地核—地幔之间的耦合效应
5. 长周期变化 (大于 10 年)	太阳活动周期调制
6. 长期缓慢变化	日、月等引起潮汐摩擦导致自转减速

表 1 中未列入目前尚有争议的一些扰动源, 如太阳活动的短周期调制、太阳耀斑的瞬时效应和太阳风的作用等。由表 1 可见, 所列出的扰动源中很多与太阳有关。太阳的引力产生潮汐效应。太阳辐射可产生地球大气变化, 导致低层大气角动量变化, 再与固体地球交换角动量, 影响地球自转。潮汐和大气效应均有多种时标。还有人认为平流层的准两年周期起源于太阳中微子流准两年振动造成的太阳辐射变化^[5]。

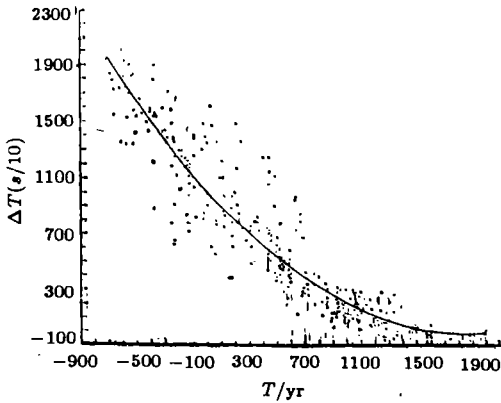


图 3 ΔT 的超长期变化及拟合曲线^[4]

它大致相当于每世纪日长增大 2.4ms。另一方面, 由图 3 所示的 ΔT 变化可以推算出三千年以来地球自转速度的实际相对变化只有

$$\frac{\dot{\omega}}{\omega} = (-19.9 \pm 1.8) \times 10^{-11} \cdot \text{yr}^{-1} \quad (7)$$

这表明似乎存在一种导致地球自转长期加速的非潮汐效应, 它对地球自转速度相对变化的贡献为 (6) 和 (7) 式之差, 即

$$\frac{\dot{\omega}_{\text{NT}}}{\omega} = (8.3 \pm 0.5) \times 10^{-11} \cdot \text{yr}^{-1} \quad (8)$$

1.3 地球自转长期变化中的潮汐效应和非潮汐效应

在上述各种扰动源中, 日、月等天体引力引起的潮汐摩擦造成地球自转长期减慢是最为肯定的效应。并且能从理论上估算出潮汐效应产生的地球自转角速度相对变化为^[4]

$$\frac{\dot{\omega}_T}{\omega} = (-28.2 \pm 1.3) \times 10^{-11} \cdot \text{yr}^{-1} \quad (6)$$

大致对应于每世纪日长缩短 1ms。

同时，有些学者还认为地球自转变化也是不均匀的^[1,6]，即(6)式的 $\frac{\dot{\omega}}{\omega}$ 并不是常数，而是随时间变化的。Newton^[7]认为 $\frac{\dot{\omega}}{\omega}$ 以千年为时标的变化可以表示为

$$\frac{\dot{\omega}}{\omega} \times 10^{-11} \cdot \text{yr}^{-1} = -10.8 + 1.032T + 0.0229T^2 \quad (9)$$

不过对这一点尚有争议。文献[4]中对不同时段的分析表明， $\frac{\dot{\omega}}{\omega}$ 并未随时间变化。

造成地球自转长期加速的非潮汐效应是如何来的？的确是一个值得探索的问题。近年来的研究表明，天气变化、海洋中的厄尔尼诺现象以及地震的发生，均与地球自转变化有关。因此关于地球自转变化规律及其原因的研究，不仅具有理论意义，还有重要的实用价值。

2 太阳活动对地球自转变化的影响

在影响地球自转变化的太阳扰动源中，除了太阳引力引起的潮汐摩擦和因地球公转引起不同地区接受太阳辐射情况随季节变化导致大气角动量随季节变化外，已经提出的还有太阳活动对地球自转的周期性调制和一些太阳大耀斑可能造成的地球自转突然减速，以及目前尚有争议的太阳风的影响。鉴于太阳活动周期、太阳耀斑和太阳风都是太阳物理现象，不妨把这三种效应称为地球自转变化中的太阳物理效应。本节中将讨论太阳活动周期和太阳耀斑对地球自转的影响，下一节中将论述太阳风的作用。

2.1 太阳活动周期对地球自转的调制

太阳活动是指发生在太阳表面的偶发事件，如日面出现太阳黑子、谱斑、日珥和耀斑爆发等，其中太阳耀斑是最剧烈的太阳活动现象。日面上出现太阳活动现象时，特别是发生耀斑时，往往发射很强的短波(X射线和紫外线)和高能粒子流(主要为电子和质子)。这些活动现象大多集中在以黑子为中心的日面局部区域(称为太阳活动区)，并且可以用表征黑子多寡的所谓黑子相对数 R 来代表太阳活动的总体水平(每天一个 R 值)。对黑子相对数长期记录的分析表明，太阳活动的强弱具有平均长度为11年的显著周期(称为太阳活动周)。太阳黑子的磁场极性分布具有22年周期(称为太阳磁周)。黑子相对数 R 的变化中可能还包含其他一些不太显著的周期和准周期。许多研究者已经发现，在地球自转变化中也存在一些与太阳活动相似的周期，意味着太阳活动的强弱影响到地球自转。

罗时芳等人^[8]分析了1821—1970年间日长变化的谱分布之后认为，日长变化中存在长度约为11、22、60年和90年的周期，它们与太阳活动周期对应。随后Picchio^[9]利用1970—1980年间的日长资料作了类似分析，证实了上述结果。Djurouvic^[10]的研究表明，太阳活动和日长变化中除了11年周期外，还存在0.5、3.3年和6.0年的短周期变化。顾震年^[11]对近200年的黑子和日长资料的分析结果表明，日长周年变化振幅的最大值和最小值分别出现在太阳活动11年周期中的峰年和谷年；并且认为这是地球公转引起地球南北半球之间季节性大气角动量不平衡产生的剩余角动量在太阳活动峰年大于谷年的反映，亦即太阳活动的强弱通过对大气角动量的调节影响地球自转。顾震年^[12]对这些资料分析得到的另一结论是太阳活动峰年和谷年大体上对应于日长增大和缩短。

李志安等人^[13]对1972—1990年间的太阳黑子相对数、波长为10cm的太阳射电流量、日长和大气角动量等资料进行比较分析后认为，这些资料中均存在长度为50d的周期振荡，

而且日长和大气角动量的振荡是由太阳活动激发的。可是郑大伟^[14]利用 1976—1990 年间的黑子相对数、日长和大气角动量资料所作的分析则表明,日长和大气角动量变化中的 30—70d 起伏属随机游动性质,不是稳定的周期振荡,不能证实在 30—70d 时标上太阳活动会通过大气影响地球自转。

总的说来,关于太阳活动影响地球自转的研究结果中,比较肯定的是太阳活动的最显著周期,即 11 年周期,确实对地球自转起调制作用,22 年周期调制的可能性也很大。至于许多研究者提出的太阳活动与日长变化中存在的其他对应周期,则有较大分歧。这在很大程度上与不同研究者采用的资料类型、时段和分析方法不同有关,从而具有较大的不确定性。

太阳活动会影响地球自转,从原理上是可以理解的。因为太阳活动现象产生的太阳的短波辐射和粒子流将使地球高层大气发生扰动,然后传递到低层大气,影响地球自转。图 4 为与地球自转有关的日地关系示意。由图 4 可见,太阳活动最终影响到固体地球的过程是相当复杂的。其中有两条主要的作用途径:其一是太阳活动区发射的短波辐射将使地球电离层受扰(电高度增大),这种扰动向下传输,使低层大气角动量变化,经过角动量交换影响地球自转。另一途径是太阳活动区发射的高能带电粒子将冲击磁层和电离层,带电粒子流对磁层的冲击将产生力矩,直接影响地球自转;而它们对电离层的冲击则与短波辐射的扰动一样,将会通过地球高空大气与低空大气之间的耦合向下传输,改变低层大气角动量,再作用于固体地球。目前尚不清楚太阳活动对地球自转的影响中,短波辐射和粒子流哪一种更重要,即哪一条途径是主要的,各起多大作用。因此,虽然从定性上易于解释,但有说服力的定量讨论是很困难的,这些过程涉及磁层和电离层物理、大气物理和光化学等诸多领域。要回答为什么太阳活动峰年对应于日长增大而非缩短,就必须进行深入的定量讨论。

2.2 有些太阳耀斑可能使地球自转突然变慢

一次大耀斑发射的能量可达到 10^{32} erg 量级,其中高能粒子流(单个粒子能量可达 10^7 — 10^9 eV)和较低能量但流量更大的等离子体云(单个粒子能量约为 10^3 — 10^5 eV)合计的能量超过一半,其余为 X 射线、紫外线和其他波段的光辐射。X 射线和紫外辐射于 8 分多钟到达地球,产生电离层突然骚扰。庞大的低能等离子体云在日地空间传播时,形成一种大尺度的驱动型行星际激波,它于 1—3d 后到达地球,冲击地球磁层和电离层,引起磁爆和电离层爆,同时也使高空大气发生变化。由图 4 可见,耀斑影响地球自转也有两种可能途径,其一是由它发射的粒子流与磁层相互作用产生的力矩直接影响地球自转;另一是由短波辐射和粒子流对电离层冲击产生的扰动,通过大气不同层次的耦合传递到低层大气,改变低层大气的角动量,再影响到地球自转。这些过程与其他太阳活动现象对地球自转的影响过程是相似的。但是由于耀斑的能量远比其他活动现象高得多,因而个别耀斑事件就有可能影响地球自转。这一点与表征太阳活动平均水平变化的太阳活动周期通过大量活动现象的累积效果影响地球自转有所不同。

早在 1960 年,叶叔华和肖宝亲^[15]就提出 1959 年 7 月下旬实测到的地球自转突然变慢约 0.8ms(测量精度为 ± 0.2 ms)可能与 7 月上旬发生的太阳大耀斑有关。Danjon^[16]对这一突然变慢作了同样的解释。Gribbin 等人^[17]和 Plageman 等人^[18]也发现 1972 年 8 月发生大耀斑之后,地球自转又突然变慢。可是 1960 年 11 月和 1989 年 10 月各发生一次特大耀斑之后,并未观测到地球自转变化。冯博曾对此作了研究^[19],他认为太阳耀斑是否影响地球自转取决于耀斑发射的粒子流激发行星际激波状态。当不同耀斑激发的两个行星际激波的时间

间隔小于 60h(这样的两个激波被称为激波对)，而且其中后随激波的速度 V_2 远大于先导激波的速度 V_1 时，会发生激波追赶现象。这种情况下，先导激波冲击磁层，在磁层受扰尚未恢复时，又遭受后随激波的再度冲击，产生更大的扰动，这种特大扰动向下传输，就有可能影响地球自转。他对 1959—1989 年间的太阳耀斑引起的 15 个激波对进行分析(以起始磁爆的开始时刻代表激波到达地球的时间)，结果表明，只有 1959 年 7 月和 1972 年 8 月的两个激波对满足 V_2 远大于 V_1 的条件，因而影响地球自转，而其余情况均不满足此条件，因而未影响地球自转。这种解释是否合理有待进一步证实。

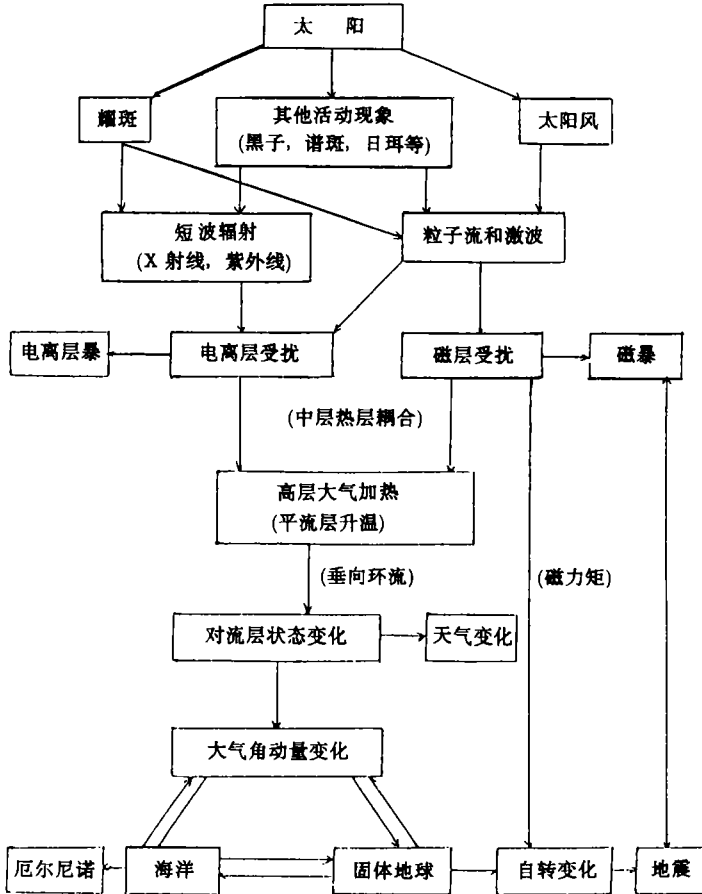


图 4 与地球自转变化有关的日地关系示意

3 关于太阳风对地球自转的影响

3.1 太阳风作用于磁层的力矩

由于太阳外层大气受到非辐射能源的反常加热，使得在日心距超过几个太阳半径以外的太阳大气(外日冕层)中粒子的平均动能 $(5/2)kT$ 超过该处的重力势能 $M_{\odot}g_0R_0^2/r$ (其中 M_{\odot} 为太阳质量， R_0 为太阳半径， g_0 为日心距 $r = R_0$ 时的重力加速度)，导致大气中粒子向

外膨胀，称为太阳风，实际上就是动态日冕，它可以延伸到日心距为几万太阳半径的日球层边界。在地球轨道附近太阳风参数的实测值为：粒子数密度 $n_H = n_e \approx 5$ 个/cm³，平均速度 $V \approx 500\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ ，磁场 $H \approx 5 \times 10^{-5}\text{G} \approx 5\gamma$ ，质子温度 $T_p \approx 4 \times 10^4\text{K}$ ，电子温度 $T_e \approx 1.5 \times 10^5\text{K}$ 。由太阳出发的太阳风粒子大约于 3.5d 后到达地球。通常把这种从整个太阳向四面八方连续发射的太阳风称为宁静太阳风，以区别于另一种来自太阳上某些局部区域（冕洞区）的更为定向且粒子平均速度高达 $700\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的高速太阳风。

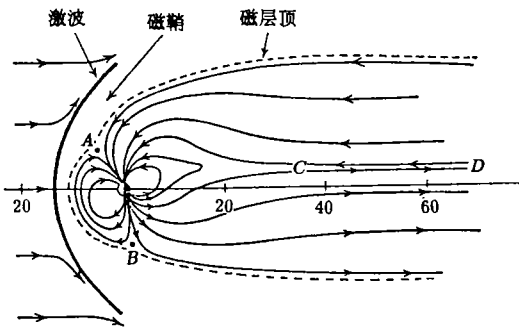


图 5 日下点磁子午面上的磁层结构 (图中 A 和 B 为两个中性点，CD 上有一中性片，数字为以地球半径为单位的日心距离)

的磁层顶近于圆锥形，背阳侧为长圆柱形，称为磁尾，磁尾中央有磁力线方向相反的薄夹层，称中性片。地球轨道附近的太阳风为超声速流，受到磁层的阻挡，在向阳面的磁层顶前方形成弓形激波面。太阳风是带电粒子（主要为质子和电子）的集合体，它们到达磁层后，不同电荷和能量的粒子沿着不同的轨道在磁层中运动，形成各种电流系统。目前已探明在磁层中至少有三个主要的电流系统（见图 6）：（1）在磁层顶附近流动的磁层顶电流；（2）在磁尾中流经中性片的磁尾电流；（3）在地心距约为几个地球半径高空环绕地球的环电流。根据电动力学，太阳风冲击磁层产生电流系统，它感应的磁场 B 与地磁偶极子的磁矩 M 互相作用，必然产生力矩

$$T = M \times B \tag{11}$$

原则上说，只要这个力矩在地球自转方向有足够大的分量，就能影响地球自转。

然而实际上，人们对于变形的地磁场磁矩 M 和太阳风产生的感应磁场 B 的具体形式，知之甚少。因而要定量计算力矩 T 是相当困难的。同时，空间飞行器的实际探测表明，太阳风中除了宁静风之外，还含有不断变化的扰动成分，包括来自冕洞的高速太阳风，以及太阳活动区（尤其是太阳耀斑）发射

地球磁场原本为对称的偶极子场，与磁铁棒的磁场相似。可是受到太阳风的压缩，形成非对称的磁层形状。图 5 所示为包含日心和地磁轴的磁子午面（也称日下点磁子午面）上的磁层结构。其中太阳风与磁层的交界面称为磁层顶，它的形状由太阳风压力与地磁场的场压力平衡方程确定：

$$2mNV^2 = \frac{H^2}{8\pi} \tag{10}$$

其中 m 为质子质量， V 和 N 为太阳风速度和粒子数密度， H 为磁场。向阳侧

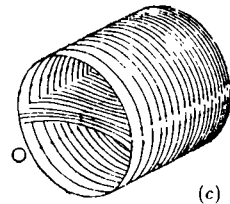
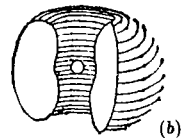
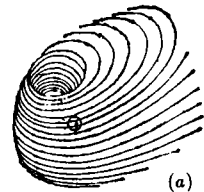


图 6 磁层中的主要电流系统
(a) 磁层顶电流；(b) 环电流；
(c) 磁尾电流

的粒子流。而且，地球公转还造成太阳风速度与地磁轴的交角不断变化。这些情况使 M 和 B 均遭受非常复杂的变化。目前空间探测器的数目有限，要在广阔的日地空间实施不同的地域的同时性探测，来构造一幅完整的 M 和 B 演化图像，其难度之大可想而知。另一方面，从理论上进行简化的模型计算，又可能与实际情况相去很远。再加上目前尚缺乏太阳风影响地球自转变化的观测证据，因而迄今对于太阳风是否影响地球自转问题，存在颇多争议。

3.2 太阳风力矩的理论估算

早在 60—70 年代，国外已有不少学者从理论上估计太阳风力矩的大小。例如，Jaddy^[20] 在平面层近似的磁层模型下，讨论了太阳风对地磁偶极场的力矩，得到当太阳风引起的地磁场水平分量变化为 20、40 γ 和 50 γ 时，对应力矩大小为 1.7×10^{15} 、 3.3×10^{15} N·m 和 4.1×10^{15} N·m，比月亮引起的潮汐力矩小一个量级，因而认为它不会产生 ms 级的日长变化。

Papagiannis^[21] 采用更为实际的 Olson 磁层模型，对太阳风的作用力矩作了仔细的数值计算，结果表明力矩可以表示为

$$T = (M^2 \tan \psi) / (2r_s)^2 \quad (12)$$

其中 M 为地磁场的磁矩 ($M \approx 8 \times 10^{25}$ G·cm⁻³)， ψ 为偶极轴与太阳风夹角的补角，而 r_s 为磁层顶上下点 (日地连线与磁层顶的交点) 的地心距离。(12) 式表明力矩依赖于地磁轴相对于太阳风的倾角。由于 r_s 的变化不大，若取平均值，则 (12) 式成为

$$T \approx 2.6 \times 10^{14} \tan \psi \text{ N} \cdot \text{m} \quad (13)$$

倾角 ψ 的变化范围为 0°—35°，对应的力矩大小为 0 至 1.82×10^{14} N·m。即当地磁轴与太阳风速度垂直时，力矩为零；而当倾角 $\psi = 35^\circ$ 时，力矩最大，达到上限值 1.82×10^{14} N·m，比 Jaddy 的结果小一个量级。图 7 为 Papagiannis 计算得到的 $\psi = 30^\circ$ 时日下点磁子午面内磁层顶各处的太阳风压力分布。由图 7 可见，这种作用力分布的总效果是倾向于使磁偶极轴恢复到 $\psi = 0^\circ$ 的平衡状态。

在 Papagiannis 对太阳风力矩的计算中，是先计算磁层顶上两个对称面元的压力差和力矩，然后再对整个磁层积分，得到总力矩。但从量纲分析上可以看出，这种处理实际上同利用 (11) 式的电动力学方法是等效的。Carovillano 和 Siscoe^[22,23] 就是直接计算磁层顶电流感应的磁场对地磁偶极场产生的力矩，所得结果与 Papaginnis 的是一致的。

Olson^[24] 也按 (11) 式计算磁层顶电流感应的磁场 B 对偶极场磁矩 M 的力矩随倾角 ψ 的变化，结果如图 8 所示。图 8 中下面的曲线表示力矩，上面的曲线表示地磁偶极矩 M 在外磁场 B 中的位能。

$$U = -M \cdot B \quad (14)$$

由图 8 可见，当 $\psi = 35^\circ$ 时，最大力矩约为 8×10^{13} N·m $\approx 10^{14}$ N·m，与 Papaginnis 的结果同一量级，因而也认为不会影响地球自转。

我国学者也对太阳风力矩作过估算。顾震年^[25] 应用 Papagiannis 的磁力矩表示式

$$T = 4mNV^2 r_0^3 \frac{\tan \psi}{2.55 \rho_s} \quad (15)$$

其中 m 为质子质量， N 为太阳风粒子数密度， V 为太阳风速度， $\rho_s = \frac{r_s}{r_0}$ 。 r_s 和 r_0 分别为磁轴倾角为 ψ 和 90° 时磁层顶日下点的地心距离。若取较大的太阳风速度 $V = 8 \times 10^7$ cm·s⁻¹

和密度 $N = 10 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$ ，则得 $\psi = 35^\circ$ 时的极大力矩为 $T = 2.65 \times 10^{15} \text{ N} \cdot \text{m}$ ，比 Papagiannis 和 Olson 的结果大一个量级，与 Jaddy 的结果一致，但仍比月球的潮汐力矩小一个量级。其结论为难以确定太阳风是导致地球自转长期加速的非潮汐效应中的重要因素。

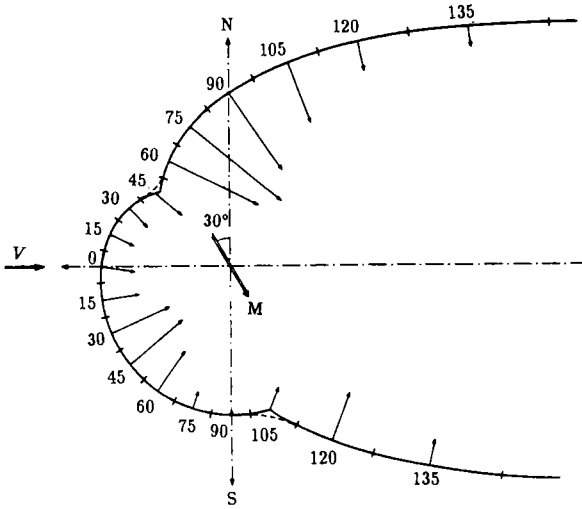


图 7 日下点子午面上磁层顶各处的太阳风压力分布(磁轴倾角 $\psi = 30^\circ$)^[21]
图中带箭头的线段长度与压力成正比

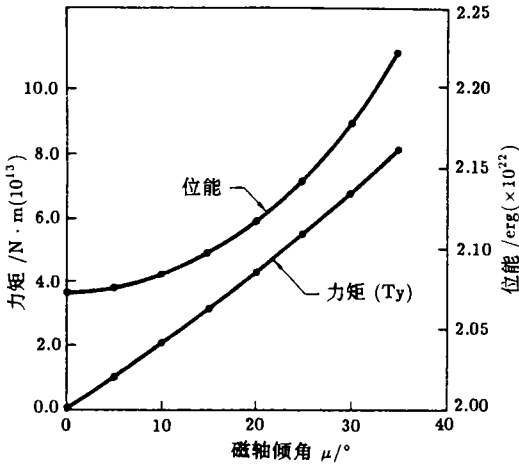


图 8 太阳风对磁层的力矩和位能随磁轴倾角的变化^[24]。

左边和右边的纵坐标分别表示力矩和位能，横坐标表示磁轴倾角 μ (即本文中的 ψ)

冯博则从太阳风能量耗散的角度来估计太阳风力矩^[27]。宁静太阳风注入磁层的能量约为 $10^{20} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$ ，而扰动太阳风则可达 $10^{22} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[28]。Dessler 也曾指出^[29]，在磁爆期间，大约有 10^{25} erg 能量在 10^4 s 内注入地球高层大气，也就是磁爆太阳风的注入功率为 10^{14} W 。其中只有很少部分 ($3 \times 10^{11} \text{ W}$) 在电离层中耗散，其余绝大部分将通过某种物理过程传输到

另一方面，顾震年和 Paquet 的研究表明^[26]，实测得到的日长周年(季节)变化中的变幅比按大气角动量推算的日长周年(季节)变化的应有变幅大约高 20% (约 0.06ms)。而这个差别可以用太阳风对磁层力矩的周年(季节)变化给予解释。他们指出，以往关于太阳风力矩的讨论中忽略了磁层磁力线分布相对于日-地-黄极平面的不对称性。实际上由于地球自转轴对其公转轨道面的倾斜，磁层力线相对于上述平面是不对称的。这种不对称产生的剩余力矩在春季将使地球自转加速，而秋季则使其减速，从而导致实测的日长在春季小于按大气角动量的推算值，而在秋季则大于推算值。若取磁尾电流密度为 $\sigma = 5 \times 10^5 \text{ A}/R_E$ (R_E 为地球半径)，则可推得剩余力矩恰可补偿 0.06ms 的差值。

低层大气(平流和对流层), 导致低层大气角动量变化, 影响地球自转。利用公式^[30]

$$L = P \cdot \Delta t \quad (16)$$

其中 L 为等效力矩, P 为耗散功率, Δt 为耗散时间。代入上述数据, 可得 $L = 10^{18} \text{N} \cdot \text{m}$, 比月球潮汐力矩还要大 2 个量级, 足以影响地球自转。显然, 这种估算实际上是假定全部耗散能量都转化为力矩, 这是不可能的。更可能的情况是, 绝大部分能量传输到低层大气后, 以加热大气、形成对流和湍流以及无定向风的形式耗散, 只有很小一部分耗能转化为有效力矩。

3.3 太阳风影响地球自转的观测证据

虽然很早就有人指出太阳风可能影响地球自转, 可是迄今关于太阳风影响地球自转观测证据的论文很少。Kalinin 和 Kisselev^[31] 曾经研究太阳风年平均速度 V 与日长变化 ΔLOD 平均值之间的关系, 得到其相关系数为 -0.84 , 可见两者的关系相当密切, 而且太阳风平均速度增大使地球自转加快。这一点与太阳耀斑和太阳活动增强使地球自转变慢正好相反。如前所述, 如果太阳耀斑主要是通过它发射的粒子流激发行星际激波作用于磁层来影响地球自转, 使自转变慢, 那么太阳风的粒子流却使自转加快, 令人费解。冯博^[27] 曾对 1976—1987 年间 5d 平均的太阳风速度、地磁扰动指数 C_9 、电离层临界频率、大气角动量和日长变化等 5 种资料序列进行频谱分析, 结果表明(见图 9), 在短于 100d 的时标中, 它们之间隐约显示出有 13.6d, 26—29d, 30—40d, 50—70d 和 90d 左右的相似周期, 但是并非确切的一一对应, 可见具有较大不确定性。

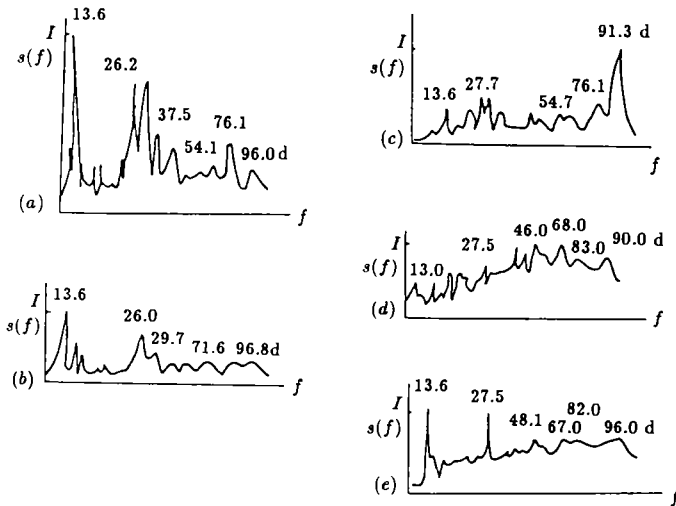


图 9 太阳风速度、磁扰指数、电离层临界频率、大气角动量和日长变化的频谱比较^[27]
(a) 太阳风速度, (b) 磁扰指数, (c) 电离层临界频率, (d) 大气角动量, (e) 日长变化

4 总 结

由以上情况, 可得如下结论。

(1) 最近三千年地球自转速度长期变化的相对值大约为 $\dot{\omega}/\omega = (-19.9 \pm 1.8) \times 10^{-11} \cdot yr^{-1}$, 如果认为理论计算潮汐效应引起地球自转速度相对变化 $\dot{\omega}_T/\omega = (-28.2 + 1.3) \times 10^{-11} \cdot yr^{-1}$ 是可信的, 则地球自转中确实存在非潮汐效应引起的自转长期加速, 它对自转速度相对变化的贡献约为 $\dot{\omega}_{NT}/\omega = (8.3 \pm 0.5) \times 10^{-11} \cdot yr^{-1}$ 。地球自转的非潮汐效应包括那些因素, 其中太阳物理效应占多大份量, 很值得进行探索。

(2) 基本上可以肯定地球自转变化中存在太阳活动 11 年周期的证据, 太阳活动的 22 年磁性周期也有反映迹象。这两种周期之外的太阳活动周期并不显著, 而采用不同的太阳活动指数和不同时段的数据, 以及采用不同的分析方法, 得到的周期数值不很一致。在这种情况下, 从地球自转变化中寻找太阳活动其他周期的反映, 具有较大不确定性, 似乎意义不大。

(3) 太阳活动水平的强和弱大致对应于地球自转减慢和加快。可是这种影响的物理过程尚不清楚。也不能确定是太阳活动产生的短波辐射还是粒子辐射起主要作用, 似乎可以设计出一些研究方案来澄清这些问题。

(4) 有些太阳耀斑可能导致地球自转突然减慢, 但并非所有耀斑有此效应。对这一现象虽然有初步解释, 但是仍然需要收集一些大耀斑事件的综合资料, 包括耀斑的各种辐射, 它们产生的行星际空间效应和地球大气效应的资料, 研究一个特定事件中从耀斑经日地空间直到地球表面所发生的连锁反应, 以便确切地了解太阳耀斑影响地球自转的物理机制。

(5) 迄今为止, 尚缺乏关于太阳风影响地球自转的确切观测证据。应当在这方面加强研究, 收集太阳风的有关资料, 与地球自转资料进行比较分析, 寻找有说服力的相关证据。

(6) 关于太阳风力矩的理论研究结果, 很大程度上与所采用的太阳风和磁层模型以及有关参数的选取有关, 因而存在较大分歧。但多数研究者认为其量级在 10^{14} — $10^{15} N \cdot m$ 之间, 即小于月球潮汐力矩 1—2 个量级, 似不可能影响地球自转。不过也有研究者认为其量级可能更大。这个问题值得进一步探讨。应考虑在太阳风和磁层模型以及物理参数的选取方面, 利用空间探测的最新资料, 同时考虑太阳风引起的磁层中多种电流系统的综合作用, 可期望得到新的结果。这是一个以日地空间物理为主又涉及太阳物理和地球动力学的边缘领域, 以日地空间物理学者为主, 与其他学科研究者合作, 将会有明显的科研优势。

参 考 文 献

- [1] Stephenson R F, Said S S. *Astron. Astrophys.*, 1989, 215: 181
- [2] 吴守贤, 刘次沅. *天文学进展*, 1987, 5: 147
- [3] 郑大伟. *天文学进展*, 1988, 6: 316
- [4] 谢丽林, 赵 铭. *天文学报*, 1989, 30: 315
- [5] 冯 博, 丁华灵. *陕西天文台台刊*, 1991, 14: 71
- [6] 韩延本, 张培瑜. *地球物理学进展*, 1994, 9: 91
- [7] Newton R R. *Ancient astronomical observations and the accelerations of the Earth and Moon*. [s.l.]:[s.n.], 1970
- [8] 罗时芳等. *天文学报*, 1974, 15: 79
- [9] Picchio G. *Astron. Astrophys.*, 1982, 111: 326
- [10] Djurouric D. *Astron. Astrophys.*, 1981, 100: 156
- [11] Gu Zhennian. *Earth, Moon and Planets*, 1990, 48: 189
- [12] 顾震年. *天地生综合研究*. 北京: 中国科学技术出版社, 1989. 214
- [13] Li Zhian, Chen Li, Lin Qiao. In: Mueller I I, Kolaczek eds. *Developments in astrometry and their impact on astrophysics and geodynamics*, Dordrecht: Kluwer, 1993. 338

- [14] Dawei Zheng, Hui Gu. In: Mueller I I, Kolaczek eds. *Developments in astronomy and their impact on astrophysics and geodynamics*. Dordrecht: Kluwer, 1993. 337
- [15] 叶叔华, 肖宝亲. *天文学报*, 1960, 8: 68
- [16] Danjon A. C. R. Acad. Sci. Paris, 1962, 254: 2479
- [17] Gribbin J *et al.* *Nature*, 1973, 243: 26
- [18] Plageman S H *et al.* *World Date Center A: Solar-Terrestrial Physics Report UAG-28*, 1973
- [19] 冯 博. *天文学报*, 1991, 32: 73
- [20] Jaddy R I. In: Mansinha I *et al* eds. *Earthquake displacement fields and the rotation of the Earth*. [s.l.]:[s.n.], 1970. 115
- [21] Papagiannis M D. J. *Geophys. Res.*, 1973, 78: 7968
- [22] Carovillano R L, Siscoe G L. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 1973, 11: 289
- [23] Siscoe G L. *Rev. Geophys Space Phys.*, 1974, 12: 135
- [24] Olson W P. J. *Geophys. Res.*, 1994, 79: 1128
- [25] 顾震年. *中国科学院上海天文台年刊*, 1989, (10): 23
- [26] Gu Zhennian, Paquet P. *Earth, Moon and Planets*, 1993, 62: 259
- [27] Feng Bo. In: Montag H, Reigher C eds. *Geodesy and physics of the Earth, Proc of IAG symp. No.112*, Berlin: Springer-Verlag, 1993: 447
- [28] Hultqvist B. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 1969, 7: 129
- [29] Dessler A T. *NASA SP-316*, 1975, 187
- [30] Volland H. *Earth's relation from eons to days*. Berlin: Springer-Verlag, 1990
- [31] Kalinin Yu D, Kisselev V M. *Geomagnetizm i Aeronomyia*, 1980, 20 (6), 997 (俄文)

(责任编辑 刘金铭)

The Effect of Solar Physics on the Variation of the Earth Rotation

Lin Yuanzhang

(Beijing Astronomical Observatory, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract

The present situation of the study concerning the effects of solar activity and solar wind on the variation of the earth rotation is described in this paper. At first, the expressions and the measurements of the variation of the earth rotation, the disturbing sources causing the variation of the earth rotation, as well as the tidal and the non-tidal effects in the long term variation of the earth rotation are explained. Then, the current researches about the modulation of periods of solar activity in the earth rotation, the possible sudden retardation of the earth rotation by solar flares, and the possibility of influence of solar wind on the earth rotation are reviewed. And a brief summary is given finally.

Key words Earth—Sun: activity—Sun: flares—solar wind—solar—terrestrial relations