地球自转速率在千年尺度下长期变化的研究

谢丽林 赵 铭
（中科院上海天文台）

提 要

本文对怎样根据古代天象记录来研究地球自转速率长期变化（千年尺度下）以及对讨论长期变化的物理机制所涉及的基本概念和基本理论作了较系统的阐述，并对国内外有关的最新成果作一介绍。

一、引 言

地球自转速率长期变化的研究是地球自转研究的重要课题之一，它对了解地球自转变化图象和验证某些地球物理模型均有重要意义。

地球自转速率的长期变化实际上是在寻找月亮轨道运动显著加速的原因时发现的。地月潮汐(主要指海潮)摩擦的发现不仅解释了月球轨道的长期加速，同时推断出地球自转速率也应因此而有一长期减速。当时求算描述地球自转长期减速的角加速度数值，主要是根据月球、太阳或行星的天文观测得出的月亮轨道运动平均角加速度值和地月角动量守恒原理而得到的。

用古天象记录资料来求解地球自转角加速度的历史和主要工作，在吴守贤等的文章[1]中已有较详细的介绍。人们考查由古天文资料得到的角加速度值，发现它在数值上并不能完全用地月潮汐摩擦来解释，其不能解释的部分称为非潮汐角加速度，对应的物理机制称为非潮汐因素。

对地球自转速率长期变化的研究，无外乎测定其角加速度的数值和分析其机制两大部分。本文的目的在于利用目前已有资料来系统归纳解决上述问题的程序，并展现目前问题的解决程度。

二、长期变化的检测

1．检测地球自转变化的一般原理

描述任何一种运动都离不开时间系统，自转运动也不例外。在天文系统内使用过的时间系统有世界时、历书时、原子时等。根据地球自转运动测得的时间系统为世界时，它是由格林尼治子午圈相对于平太阳的位置决定的。根据太阳系内天体的轨道运动历表确定的时间尺

1988年2月3日收到。

度为历书时。而原子时是以物质量子跃迁所辐射或吸收的电磁波频率为基准得到的时间系统。

人们最早建立世界时系统是把它作为时间基准来使用的，当时认为地球钟是均匀和永恒的，人们通过天文观测确定地球钟的读数和速度。随着精密石英钟特别是原子钟的出现，人们发现地球钟原来是不均匀的，其速度有多种变化。现代精密的原子钟精度可达10^{-15}，而地球钟只能达到10^{-8}，因此地球钟已不可能再作为一种时间基准，这样，世界时也失去了作为一种时间基准的概念，反而成了描述地球自转变化的一个参数。由此看到，要检测地球自转速率的变化，必须具备两个条件：(1) 有与地球自转无关的、稳定度优于地球钟的某种计时钟作为标准；(2) 有相距一定时间跨度的两个以上历元的地球钟与"标准钟"的比对记录。

至今用于自转速率变化研究的观测资料序列，按记录的时代可分为：地质时期(百万年尺度)，历史时期(千年尺度)，望远镜观测时期(百年尺度)。各个时期采用的"标准钟"不同，取得地球钟读数的方式也不同。地质时期主要通过发现古生物钟如珊瑚、双贝壳类、迭层等来推知当时一年所含的天数，若假定当时一年的长度和现在的一样，则可推出当时的日长。对历史时期中自转变化的检测，人们主要借助于史料记载的天象，将太阳系内某些天体(如月球、地球、行星等)的轨道运动作为"标准钟"，来和天象发生时地球钟的记录时刻作比较。望远镜的发明使地球钟的读数精度提高了几个数量级，原子钟的应用提供了使用方便且读数精度又大大提高的标准钟。虽然检测地球自转变化的精度和时间分辨率都有了极大提高，但其基本原理仍没改变。

假设UT是地球钟的读数，TD是所参考"标准钟"的读数，两者之差：

$$\Delta T = \mathrm{TD} - \mathrm{UT} \tag{2.1}$$

通过两钟比对记录而得到，则日长的变化或自转速率的变化为：

$$\Delta l.o.d. = d(\Delta T)/dt \tag{2.2}$$

$$\Delta\omega = k_1 \Delta l.o.d. \tag{2.3}$$

其中k_1为单位换算比例系数，随两者选择的单位不同而不同。

日长的变化率或自转速率的相对变化率为：

$$d(\Delta l.o.\ d.)/dt = d^2(\Delta T)/dt^2 \tag{2.4}$$

$$\dot{\omega}/\omega = k_2 d^2(\Delta T)/dt^2 \tag{2.5}$$

其中k_2的意义类似于k_1。[2]

$$\mathrm{TD}\begin{cases}\mathrm{ET}(\text{历书时}) & 1955\text{年以前}\\ \mathrm{TA}I(\text{国际原子时}) & 1955\text{年以后}\end{cases}$$

在近几十年内ΔT序列的精度较高、样本点较密的情况下，可用内插求ΔT的一阶和二阶微分，进而求得小段时域内的$\Delta l.\ o.\ d.$和$\dot{\omega}/\omega$作为其平均历元处的瞬时值。

2．如何用古代天象记录检测长期变化

(1) 古代天象记录的特点

至少在二千多年以前，人们就开始了对天象的观测和记录，但当时大部分情况属于把天象作为一种自然奇观记录下来。如日、月食这种令人震惊的天象，在史料中留下了大量的文字记载。但只有少数文明古国，如中国，对天象有较长时间的专门观测和研究，这部分天象记录一般更可靠。古代天象记录类型较多，但并非所有天象记录都可用于测自转变化，必须

要满足上节一般原理所提到的两个条件。这类天象一般是在太阳系内天体轨道运动中发生的。这样，我们才可以以轨道运动历表为基准建立"标准钟"的时间系统。目前人们收集到的可用于转速变化研究的天象记录类型主要有：

(i) 中心食发生的地点(无时刻记录)；

(ii) 行星合或掩恒星时刻记录；

(iii) 月掩行星或恒星时刻记录；

(iv) 有时刻记录的日、月食；

(v) 太阳达二分点时刻记录；

(vi) 日食或月食食分估计；

(vii) 月落到日升、落之间的时间间隔和月升到日升、落之间的时间间隔；

(viii) 月亮中天与行星或恒星中天的时间间隔；

(ix) 月亮方位角和地平高度的同时记录[3],[4]。

与用现代观测检测转速变化相比，利用古代天象记录检测转速变化有其不同之处：(i)观测资料不是由为了相同目的而进行的有计划的观测而得到的，而是从不同渠道收集来的。各人收集的资料所跨时域和各相邻样本点的时间间隔均不规范；(ii) 由于肉眼观测和计时工具的不精密，使得这些观测精度较低，与现在的相比差几个量级；(iii)有部分观测无时刻记录。因此，我们不能象利用现代资料那样求出各瞬时的角加速度值，而只能求出从历表历元到被样本点覆盖的这段时域内的平均角加速度。

(2) 观测方程的建立

假定 $\dot{\omega}$ 为地球自转平均角加速度，$\dot{n}$为潮汐引起的月球轨道平均角加速度。对于每一次观测，我们均可列出观测方程：

$$X_i\dot{n} + Y_i\dot{\omega} = f_i(o-c) \tag{2.6}$$

其中X_i,Y_i对于第 i 次观测来说为常系数，它随观测类别的不同而不同。$f_i(o-c)$为各观测中由纯引力理论推出的理论值与实际观测值之差，它可以是时刻、经度或食分[5]。下面我们分别就各类观测列出(2.6)的形式，并讨论实算中怎样求得$f_i(o-c)$。

(i) 中心食发生的地点

日全食在地表经过的路径很窄，约100公里。已知中心食发生的地点即已知日食中心线在地表位置的实际地理经度λ_0，我们根据已知的日期、地点，即可从引力公式推出日食发生时日食中心线的历书经度λ_e，由此可得$\lambda_e-\lambda_0=\Delta\lambda$，这实际上是地球自转不均匀而引起的格林尼治子午圈和历书子午圈相对位置不断变化的体现[6]。$\Delta\lambda$与$\dot{\omega}$. $\dot{n}$的关系为：

$$\Delta\lambda = \frac{1}{2}\dot{\omega}T^2/[\dot{n}/(n_{月}-n_{\odot})-\dot{\omega}/\omega]^{[7]} \tag{2.7}$$

$$\Delta T = \Delta\lambda/1.002738^{[8]} \tag{2.8}$$

其中T为观测历元到历表历元的世纪数，$n_{月}$.$n_{\odot}$分别为月球和太阳轨道运动的角速度，ω为地球自转的平均角速度。

(ii) 行星合或掩恒星的时刻记录

已知行星合或掩恒星的时刻T_0，这时恒星的位置即为T_0时刻行星的观测位置。知道恒星的

坐标便能知道行星的黄经λ_0，另外，将T_0代入历表可求得一历书黄经λ_e。两者之差 $\Delta\lambda=\lambda_e-\lambda_0$只与$\dot{\omega}$有关：

$$\Delta\lambda=\frac{1}{2}\dot{\omega}T^2n_p/\omega^{[9]} \tag{2.9}$$

$$\Delta T=\Delta\lambda/n_p \tag{2.10}$$

其中n_p为行星轨道运动的平均角速度。

(iii) 月掩恒星的时刻记录

这一原理与行星掩恒星类似，不过关系式中多了一项由于$\dot{n}$引起的效应：

$$\Delta\lambda=\frac{1}{2}\ (n_{月}\dot{\omega}/\omega-\dot{n}\ )T^{2[10]} \tag{2.11}$$

$$\Delta T=\Delta\lambda/n_{月} \tag{2.12}$$

(iv) 月掩行星的时刻记录

已知月掩行星的时刻(掩始或掩终)T_0'，将其归算到月心时刻T_0。另外，从月历表和行星历表中我们可找到一理论时刻T_c，使得月亮位置与行星位置重合。由此可得$\Delta T=T_c-T_0$。

$$\Delta T=\frac{1}{2}\left(\frac{\dot{\omega}}{\omega}-\frac{\dot{n}}{n_{月}}\right)T^2 \tag{2.13}$$

(v) 月亮中天与恒星中天的时间间隔

其原理与月掩恒星类似。恒星中天时其赤经即为当时的恒星时，已知月亮中天与恒星中天的时间间隔，即已知月亮中天的恒星时ST。利用ST可求出月亮中天的黄经λ_0；此外，若已知观测地点则可把ST转换为世界时T_0，将T_0代入月亮月历，可求出月亮中天时黄经的理论值λ_c，由此可得$\Delta\lambda=\lambda_c-\lambda_0$，关系式同(2.11)、(2.12)。

(vi) 月亮中天与行星中天的时间间隔

与月掩行星的原理类似。已知两者中天的时间间隔，即已知两者的赤经差$\Delta\alpha$。由月亮历表和行星历表，我们可以找到一时刻T_c，使得月亮与行星赤经之差在那天为$\Delta\alpha$(假定此时月亮中天)。另外，根据T_c可推出月亮中天时的$\alpha_{月}$，这样即求出了月亮中天时的恒星ST，已知观测地点可把ST转换为世界时T_0，由此可得$\Delta T=T_c-T_0$，关系式同(2.13)。

(vii) 月落到日落、升，月升到日落、升之间的时间间隔

因为在某一确定地点，日落、日升的真太阳时是已知的，因此已知月落到日落、升及月升到日落、升之间的时间间隔，实际上即已知月落或月升时的真太阳时(近似可作为世界时)T_0。另外，已知月落、升到日落、升的时间间隔，即已知某一时刻日、月之间的角距。由日、月历表我们可找出一时刻T_c，使得日、月角距恰为记录值，我们假定这一时刻正是月升或月落时(这一假定纯属为简单起见)。由此可得$\Delta T=T_c-T_0$，关系式：

$$\Delta T=\frac{1}{2}[\dot{n}/(n_{月}-n_{\odot})-\dot{\omega}/\omega]T^2 \tag{2.14}$$

在下面我们将看到它与月食时刻记录原理类似。

(viii) 有时刻记录的日、月食

已知食发生的时刻T_0，根据食发生的地点、日期，通过日、月历表可推出历书时T_c，使日、

月位置坐标一致，由此可得$\Delta T=T_c-T_0$。需要说明的是，对于月食，由于其各食相发生的历书时对全球见食地区均相同，所以直接可求得ΔT。但日食理论见食时刻与见食地区经度密切相关，它使用的经度是历书经度λ_e，而λ_e与ΔT相关连：$\lambda_e=\lambda+1.002738\Delta T$(以西经为正)，所以只能采用迭代法求$\Delta T$。[11]关系式与(2.13)相同。

(ix) 太阳达二分点的时刻记录

已知太阳达分点的实际时刻T_0，根据太阳历表可求得太阳达分点的理论时刻T_c，这样可得$\Delta T=T_c-T_0$，它只与$\dot{\omega}$有关：

$$\Delta T=\frac{1}{2}\dot{\omega}T^2/\omega \tag{2.15}$$

(x) 日食或月食食分估计

最大月食食分$\mu_m=(R'_{月}-R_e'-2D)/2R'$(其中$R'_{月}$为月球半径，$R_e'$为地球影锥半径。$D$为影域中心轴距月亮中心的最小距离，$R'_{月}$、$R_e'$均指从地球上看所得值)，由于$\dot{n}$的存在，月亮距交点的角距要修正$\frac{1}{2}\dot{n}T^2$，因此最大食分发生的时刻要变化$\frac{1}{2}\dot{n}T^2/(n_{月}-n_{\odot})$，由于$\dot{n}$的偏差，导致食分的变化为：

$$(d\mu_m)_{月}=(1/4R')[n_{\odot}/(n_{月}-n_{\odot})]\delta\dot{n}_{月}T^2\mathrm{tg}I \tag{2.16}$$

对于月食有：

$$(d\mu_m)_{\odot}=\frac{1}{4R'}\mathrm{tg}I\frac{n_{\odot}}{n_{月}-n_{\odot}}(\delta\dot{n}_{月}-\delta\dot{\omega})T^2 \tag{2.17}$$ [12]

(xi) 月亮方位角与地平高度的同时记录

这种情况下，通过天文三角形，若已知观测地点的纬度，可求出月亮的赤纬和时角t_0，根据推出的赤纬由月历表可求得一历书时，根据此历书时可推出月球时角t_c，对同一天体，时角之差等于恒星时之差，因此我们可求得ΔT。关系式同(2.13)式。

上面所列几类观测中，目前来说，对有时刻记录的日、月食和中心食用得最多。因为这两类观测记录在古天象资料中占有很大的比例，主要来源于中国、巴比伦、阿拉伯和欧洲的中世纪时代；并且它的求算方法也比较简单。其次用得较多的是月掩星，主要来源于巴比伦。中国虽有不少月掩星记录，但大部分没有时刻记录，这使得这批资料不能很好地利用，为弥补这一缺陷，刘次沅做了一些工作[13]。有关月亮的一些观测资料目前只见Newton用过，他使用的均为巴比伦的观测资料[14]。其余的记录不多，用得也就少了。

(3) 观测方程的求解

事实上，目前我们所采用的月历表均已考虑了月球黄经的长期变化，其中包括$7.''14T^2$项和潮汐加速项$\dot{n}T^2/2$。根据近代观测资料，人们推出了较精确的$\dot{n}$值，但它是否适用于过去的几千年时间？由于目前已有足够的证据表明海平面在千年尺度下变化很小，因而浅海能量耗散变化不大；此外，引力常数变化的实测值也远远大于理论预测值，由此可认为$\dot{n}$在千年尺度下基本不变。这样，在地球自转千年尺度下长期变化的研究中将$\dot{n}$视为常数是可行的[14-16]。根据近两年的研究，$\dot{n}$的取值为$\dot{n}=(-25.3\pm1.2)''/\mathrm{cy}^2$。[17],[16]

将$\dot{n}$作为已知量代入(2.6)式，则可从每例观测中求得从历表起算历元到该观测历元时域内的平均角加速度值$\dot{\omega}$，取所有观测得到的$\dot{\omega}$值的算术平均，即可得一平均角加速度值$\dot{\omega}$。另外，若$f_1(o-c)$均为ΔT，那么对于所有观测，我们可得到一ΔT序列。对此ΔT序列作最小二乘拟合：$\Delta T=a+bT+cT^2$，T：从历表起算历元到观测历元的世纪数。得参数a,b,c，其中a、b仅与起算历元有关，而 $c=-\frac{1}{2}\dot{\omega}$，由此可得$\dot{\omega}$。各家用古天象资料得到的$\dot{\omega}$结果可参见吴守贤等(1987)文中表(3)，若取$\dot{n}=-26''/cy^2$，相对角加速度的量级约为$\frac{\dot{\omega}}{\omega}\sim 20\times10^{-11}/yr$。

三、机制讨论

Dicke (1966)从物理原理的角度出发，对一些可能对地球自转长期变化有影响的因素作了量级分析，其结果列于表1。从表1我们可以看出潮汐和海平面变化在其中占主导地位，其他因素的量级很小。[18]二十多年来，随着地球物理资料的增多和空间技术的发展，人们发现其中一部分因素的量级需要作一些修正。此外，人们还发现地壳回弹所引起的效应也是一个重要的、不可忽视的激发因素。在此我们主要讨论潮汐、冰期后效应(即地壳回弹和海平面变化)以及引力常数变化对地球角加速度的贡献。

1. 力学原理

根据刘维方程：$\dot{m}_3=\psi_3$，其中$\dot{m}_3=\dot{\omega}/\omega$为自转角速度相对变化率，$\psi_3$为激发函数：

$$\psi_3=-\Delta T_{33}/C-h_3/\omega C+\omega\int_0^t L_3dt \tag{3.1}$$

第一项为转动惯量的变化，第二项为地球内部角动量的交换，第三项为力矩作用[19]。其中任何一项的长期效应均可能对转速长期变化有贡献。

2. 潮汐因素

根据地月角动量守恒定律和牛顿第三定律可得：

$$\dot{\omega}_{T月}=44.5\dot{n} \tag{3.2}$$

据估计

$$\dot{\omega}_{T\odot}=\frac{1}{4.9}\dot{\omega}_{T月} \tag{3.3}$$

∴

$$\dot{\omega}_T=\dot{\omega}_{T月}+\dot{\omega}_{T\odot}=53.5\dot{n}\text{ [20]} \tag{3.4}$$

另外，Lambeck (1980)认为$\dot{\omega}_T=(\dot{\omega}_T|_a+\dot{\omega}_T|_e+\dot{\omega}_T|_I)_月+(\dot{\omega}_T|_a+\dot{\omega}_T|_e+\dot{\omega}_T|_I)_\odot$，其中$\dot{\omega}_T|_a$，……，表示由轨道根数$a$，……的长期变化对总角加速度的贡献。根据海洋模型和卫星观测结果，他推出：

$$\dot{\omega}_T\doteq(51\pm4)\dot{n}\text{ [21]} \tag{3.5}$$

(3.5)式与(3.4)式基本一致。

3. 冰期后效应

最后一次冰期于15000到20000年前(有人认为是16000年前)结束，而冰期持续的时间要超过一百万年，所以它对现代自然环境的许多方面都有深远的影响。冰川作用的最大结果是：

表1 几种因素对自转角加速度贡献的量级估计

影响因素	贡献量级(yr^{-1})
潮汐(包括太阳潮)	$\frac{\dot{\omega}}{\omega}=(23.5\pm25.1d)\times10^{-11}(d=0.05)$
海平面高度变化	$\frac{\dot{\omega}}{\omega}=(5.44\pm0.51)\times10^{-11}$
十年波动效应(短周期地核波动)	$\left\|\frac{\dot{\omega}}{\omega}\right\| \begin{cases}\sim0.1\times10^{-11}\\<1.2\times10^{-11}\end{cases}$
长周期核幔耦合波动	$\left\|\frac{\dot{\omega}}{\omega}\right\|<1.2\times10^{-11}$
长短周期核幔耦合波动总和	$\left\|\frac{\dot{\omega}}{\omega}\right\|<1.2\times10^{-11}$
与太阳风交换角动量	$\left\|\frac{\dot{\omega}}{\omega}\right\|<10^{-15}$
与大气交换角动量	$\left\|\frac{\dot{\omega}}{\omega}\right\|<10^{-12}$
与海洋交换角动量	$\left\|\frac{\dot{\omega}}{\omega}\right\|<10^{-12}$
大陆扰动(continental unrest)	$\left\|\frac{\dot{\omega}}{\omega}\right\|<7\times10^{-13}$
热膨胀或收缩	$\left\|\frac{\dot{\omega}}{\omega}\right\|<3\times10^{-12}$
地核的增长	$0<\frac{\dot{\omega}}{\omega}<\begin{cases}1.0 & & \text{模型 I}\\0.4 & \times10^{-12} & \text{模型 II}\\3.1 & & \text{模型 III}\end{cases}$

(1) 海平面的上升与下降；(2) 地壳的均衡调整；(3) 河流水系的改造；(4) 大量湖泊的产生；(5) 大量植物和动物群的迁移和有选择性的灭绝[22]。人们发现效应(1)、(2)可能对转速长期变化有贡献。下面我们分别讨论。

(1) 海平面的变化

海平面的变化不仅有由冰川导致的全球性水动型运动，还有由于构造运动所引起的局部地区海浸与海退，人们实测得到的是这两种类型的和，即相对海平面变化。我们在此要考虑的是水动型海平面变化，它与海水量的变化相关连。

若设海平面水动型变化高度为$\xi(t)$，单位：cm，上升为正，下降为负，则

$$\psi_3=-0.83\times10^{-9}\xi(t) \tag{3.6}$$

$$\frac{\dot{\omega}}{\omega}=-0.83\times10^{-9}\dot{\xi}(t)\ (cy^{-1}) \tag{3.7}$$

其中$\dot{\xi}(t)$的单位为cm/cy。[23]

从我们所查阅的资料来看，冰期结束后各地测得的海平面变化趋势大致是这样的：从18000年前到16000年前各测得海平面变化曲线相差不大，都表明海平面显著上升，并基本上于6000年前处收敛。而从6000年前以来，一部分地区海平面是上升的，另一部分则恰恰相反。这从侧面说明在18000年前到6000年前之间，海平面变化主要来自于水动型，因而把各地由于

局部构造运动引起的海平面变化掩盖了。但从6000年前往后水动型海平面变化有可能较小，局部构造引起的海平面变化就占主导地位，因而导致各地测得海平面变化曲线千差万别。

Pirazzoli (1977)收集了二千多年来的700多个海平面变化相对高度测定样本点。根据对这些原始资料的分析，他认为在2000年内水动型海平面变化不会超过分米量级[24]。Iames A. Clark(1980)假设从18000年前以来全球海平面上升了75米，但自5000年前以来海水量变化为零(即没有水动型海平面变化)。由此出发，他得到的结果与大部分实测曲线相符合[25]。他们两人的结果基本一致。根据(3.8)式我们有：

	$\lvert\dot{\xi}(t)\rvert$ (cm/cy)	$\lvert\dot{\omega}/\omega\rvert$ (cy^{-1})
Pirazzoli	<0.5	$<0.4\times10^{-9}$
Clark	0	0

(2) 地壳均衡效应

若假定地壳漂浮在下面的稠密层上，这个稠密层是活动且易于流动的(这可以通过地震低速带来识别)，进一步假定地壳的刚度不足以用本身的强度来支撑加在它上面的巨大重力，那么，由地球重力与地壳和下伏流动物质的密度差所造成的浮力，保证每一地壳块体都处在适当的高度。每一地壳物质柱漂浮在与其他地壳柱处于重力平衡体系的想法叫作地壳均衡理论。这是通过研究地壳构造上的重力场首次提出并得到证实的[26]。地壳均衡是质量的静平衡，但它也有动力学效应。斯堪的那维亚、格陵兰岛及北美的大地正隆起，以补偿晚期冰川带走的巨大重量。这就是按均衡隆起或地壳回弹的观点。这种调整引起的重力场的变化也反应到对地球外一点引力位的变化。设地球对距地心 r 远的引力位为：

$$U=\frac{GM_{地}}{r}\left[1-\sum_{n}\left(\frac{R}{r}\right)^{n}J_{n}P_{n}(\cos\theta)\right]^{[27]} \tag{3.8}$$

系数Jn，主要是J_2项的变化反映了U的变化。

而
$$\delta\omega(J_2)/\omega=-\delta J_2\frac{2MR^2}{3C}^{[28]} \tag{3.9}$$

所以
$$(\dot{\omega}/\omega)_{\dot{J}_2}=-\frac{2MR^2}{3C}\dot{J}_2 \tag{3.10}$$

这样，通过对地球外天体运动的观测，我们可以检测到J_2项的变化，进而得知地球重力场的变化对自转角加速度的贡献。

Yoder等人(1983)通过对卫星LAGEOS的观测得到：

$$\begin{cases}\dot{J}_2(\mathrm{LLR})=(-3.5\pm0.3)\times10^{-11}\mathrm{yr}^{-1}\\ \dot{J}_2(\mathrm{BIM})=(-4.4\pm0.4)\times10^{-11}\ \mathrm{yr}^{-1}\end{cases} \tag{3.11}$$

其中$\dot{J}_2$(LLR)和$\dot{J}_2$(BIH)分别表示用激光测月和BIH资料得到的结果。由此我们有：

$$\begin{cases}\left(\frac{\dot{\omega}}{\omega}\right)_{\dot{J}_2}(\mathrm{LLR})=(7.1\pm0.6)\times10^{-11}/\mathrm{yr}\\ \left(\frac{\dot{\omega}}{\omega}\right)_{\dot{J}_2}(\mathrm{BIH})=(8.8\pm0.8)\times10^{-11}/\mathrm{yr}\end{cases} \tag{3.12}$$

此外有个问题：(3.11)式的$\dot{J}_2$项是否均是地壳回弹引起的呢？

由冰川效应导致地表质量变化所引起的地球回弹效应可用下述驰豫方程表示：

$$\left(\frac{d}{dt}+\frac{1}{\tau_n}\right)J_n=-\frac{d}{dt}[J_n'(N)+J_n'(S)] \tag{3.13}$$

其中$J_n'(N)$和$J_n'(S)$是分别与Fenoscandian-Laurentide和Antarctic冰块相关的负荷弹性补偿系数，τ_n为回弹时间。固体岩石圈和液核的复杂情况在此不考虑，一般它对结果的影响不超过30%。根据冰川的溶化历史和方程(3.13)可推出：

$$\begin{cases}\text{当}\tau_2=2800\ \text{yr时，}\ \dot{J}_2=-3.1\times10^{-11}/\text{yr}\\ \text{当}\tau_2=75000\text{yr时，}\ \dot{J}_2=-3.2\times10^{-11}/\text{yr}\end{cases} \tag{3.14}$$

因而有 $$\left(\frac{\dot{\omega}}{\omega}\right)_{melted\ ice}=6\times10^{-11}/\text{yr} \tag{3.15}$$

与(3.12)式基本一致，这样就回答了上面的问题[29]。

4. 引力常数的变化

引力常数变化对自转角加速度贡献的量级关系为：

$$\left(\frac{\dot{\omega}}{\omega}\right)\dot{G}=1.8\,\dot{G}/G\ \ (\text{Hess}\ \ 1958) \tag{3.16}$$

$$\begin{cases}\left(\frac{\dot{I}}{I}\right)\dot{G}=0.1724\dot{G}/G^{[30]}\\ \frac{\dot{\omega}}{\omega}=-\dot{I}/I\end{cases} \tag{3.17}$$

根据狄拉克的大数假设，万有引力可能随时间变弱，这意味着G应以每年5×10^{-11}的相对速度减小。美国航天局哥达德研究所V. Canutto等六人组成的研究小组(1983)分析了从地球到火星轨道飞行器，水星、金星雷达等六年的测距结果，并与激光测距结果，企图找出由于G变小而使得这些天体轨道变大的证据，但实际上没有发现大于0.2×10^{-11}/年的变化，这比理论预期小得多[31]。

表2　$\dot{G}$变化对$\dot{\omega}$的贡献

$\dot{G}/G(\text{yr}^{-1})$　　$\dot{\omega}/\omega(\text{yr}^{-1})$	(3.16)	(3.17)
5×10^{-11}	9×10^{-11}	0.85×10^{-11}
0.2×10^{-11}	0.36×10^{-11}	0.034×10^{-11}

由表2可看到，$\dot{G}$的理论预测值所导致的角加速度是相当可观的，而实测值对$\dot{\omega}$的贡献则很小。

5. 结论

(1) 引力常数变化的量级不足以对长期角加速度有直接的贡献。

(2) 根据新的资料，海平面变化对自转长期变化的贡献没有Dicke (1966) 所估计的那么大。

(3) 在目前情况下，地壳回弹可从量级上较好地解释非潮汐效应。

参 考 文 献

[1] 吴守贤等，天文学进展，5(1987)，147—157.
[2] Stephenson, F. R. and Morrison, L. V., *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, A313 (1984), 47.
[3] Stephenson, F. R. in Tidal Friction and the Earth Rotation, I, p. 5—20, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, (1978).
[4] Newton,R. R. in The Moon's Acceleration and Its Physical Origins, II, p. 17—18, (1984).
[5] Lambeck, K., in The Earth's Variable Rotation: Geophysical Causes and Consequences, p. 304, Cambridge University Press. (1980).
[6] 韩延本等，天体物理学报，4 (1984)，107.
[7] 同[5].
[8] 同[6].
[9] 同[5].
[10] 同[5].
[11] 李致森等，《中国科学》A辑，(1985),No. 2, 163.
[12] 同[5].
[13] 刘次沅，天体物理学报，27(1986)，69.
[14] 同[2].
[15] 同[5]，p. 338.
[16] Mignard, P., in Earth Rotation: Solve and Unsolved Problem, p. 93, ed. by Anny Cazenave, (1986).
[17] Brosohe, P., in Proceeding of the International Symposim: Figure and Dynamics of the Earth, Moon and Planets, Prague, (1986).
[18] Dicke, R. H. in The Earth-Moon System, p. 43, ed. by B. G. Marsden, and G. W. Gomeron, (1966)
[19] 同[5]，p.43, 357.
[20] (英)H. 杰弗里斯著，张焕志等译，地球，268，科学出版社，(1983)。
[21] 同[5]，p. 337.
[22] (美)W. K. 汉布林著，殷维翰等译，地球动力系统，科学出版社，(1980)。
[23] 同[5]，p. 162.
[24] Pirazzali, P. A., *Paris, Z. Geomorph. N. F.*, 21 (1977), No. 3,283.
[25] Clark, J. A., in Earth Rheology, Isostasy and Eustasy, p. 329, ed. by Nile-Axeke Mõner, (1980).
[26] F. J. 索金斯著，张友南等译，地球的演化，169—173，科学出版社，(1982).
[27] P. 梅尔基奥尔著，杜品仁等译，行星地球固体潮，8，科学出版社，(1984).
[28] Yoder, C. F. et al., *Nature*, 303 (1983), 757.
[29] 同[28].
[30] Lyttlerton, R. A. and Fitch, J. P., *Ap. J.*, 221 (1978), 412.
[31] 延君，自然杂志，7 (1984)，709.

(责任编辑　林一梅)

A Review on the Research of the Variation of Earth Rotation in Thousand Year Scale

Xie Lilin　　Zhao Ming

(Shanghai Observatory, Academia Sinica)

Abstract

The principle and progress of the determination of the secular acceleration from ancient astronomical observations and its physical causes are reviewed.