

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2014.03.05

周日、半日地球自转变化研究进展

许雪晴^{1,2,3}, 董大南², 周永宏^{1,3}

(1. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 2. 华东师范大学 信息科学技术学院, 上海 200241; 3. 中国科学院 行星科学重点实验室, 上海 200030)

摘要: 主要介绍了周日、半日地球自转变化研究进展。首先介绍了周日、半日地球自转变化的研究发展历程以及主要激发因素, 近几十年来, 由于 GPS、VLBI、SLR 等观测技术和分析精度的提高, 已能用几小时甚至 1~2 h 的观测数据求解地球自转参数 (极移和自转速率变化), 并从中检测到明显的周日、半日自转变化。与海潮模型所预测的结果进行比较, 在主要的周日、半日潮波频率上, 两者的振幅和相位符合得较好, 特别是对 UT1, 符合度为 90% 左右, 极移为 60% 左右。目前, 仍有 30% 的极移周日、半日激发因素没有确定。然后对 20 世纪 80 年代以来关于极移和 UT1 的周日、半日变化研究应用, 以及不同的全球海潮改正模型作了较为全面的综述, 现有的海潮改正模型存在 10%~20% 的误差, 需要进一步的精化。最后对周日、半日地球自转变化的未来研究工作作了简单的展望。

关键词: 地球自转; 周日、半日变化; 日长变化; 极移; 海潮改正模型

中图分类号: P183.3 **文献标识码:** A

1 引 言

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、海洋在各种时空尺度上的相互作用过程, 它们在没有外力作用条件下维持总角动量守恒, 构成了复杂的地球动力学系统^[1-4]。地球的自转运动可以用地球自转参数 (ERP, 主要包括极移 PMX 、 PMY 和 $\Delta UT1$) 来描述。

固体地球自转变化的刘维方程可以写为^[5]:

$$\chi(t) = p(t) + \frac{i}{\sigma_0} \frac{dp(t)}{dt}, \quad (1)$$

$$\chi_z(t) = \frac{\Delta\Lambda(t)}{\Lambda_0}, \quad (2)$$

收稿日期: 2013-12-26; 修回日期: 2014-03-19

资助项目: 国家自然科学基金 (11303073, 11373017, 11373057); 上海市科学技术委员会 (06DZ22101)

通讯作者: 许雪晴, xqxu@shao.ac.cn

其中,

$$\begin{cases} \chi(t) = \chi_x(t) + i\chi_y(t) \quad , \\ \chi_x(t) = \frac{1.608[h_x(t) + 0.684\Omega\Delta I_{xz}(t)]}{(C - A)\Omega} \\ \chi_y(t) = \frac{1.608[h_y(t) + 0.684\Omega\Delta I_{yz}(t)]}{(C - A)\Omega} \\ \chi_z(t) = \frac{0.997}{C\Omega}[h_z(t) + 0.750\Omega\Delta I_{zz}(t)] \end{cases} \quad (3)$$

式中, $p(t)$ 是天球中间极 (CIP), σ_0 是 Chandler 摆动频率, Λ_0 是日长的平均值 86 400 s; C 和 A 为地球的主惯量矩, Ω 为平均自转角速度。其中, 式 (1) 表示的是地极移动的两个分量, 即极移; 式 (2) 表示的是自转角速度的变化, 即日长变化; 式 (3) 中的 $\chi(t)$ 是激发函数, 例如由于大气和海洋环流引起的惯量矩 ΔI_{ij} 和角动量 h_i 的变化, 由离心力与潮汐力引起的地球弹性形变, 以及伴随地幔对流的大规模质量重新分布以及核幔的电磁耦合等。总结起来, 激发函数主要包括两部分的作用: 地球内部物质分布变化引起的转动惯量变化 ΔI , 以及物质运动速度引起的相对角动量变化 Δh 。此外, 式 (3) 中引入的系数表征了地球自转弹性形变效应、内核运动和平衡态海洋影响, 以及表面负荷效应等。

虽然周日、半日地球自转在理论上早有预言, 由于观测技术的局限, 一直未能得到实测结果证实, 用实际观测资料捕捉和验证周日、半日地球自转信号成了长久以来科学家们奋斗的目标。20 世纪 70 年代曾有研究宣称, 已经从时纬观测中检测到了幅值约 0.01'' 的近周日自由摆动^[6,7]。不久它就被证明为谬误, 因为地球自转的 0.01'' 近周日自由摆动将对应数个角秒幅度的长周期自由章动 (FCN), 这样大的章动信号一直未被观测到^[8,9]。

20 世纪 70 年代以来, 随着甚长基线干涉 (VLBI)、激光测月 (LLR)、人卫激光测距 (SLR) 和全球卫星定位系统 (GPS) 等空间大地测量技术被广泛地应用到地球自转的常规监测中, 大大提高了地球自转参数的时空分辨率。还有众多服务组织的成立, 使各种空间技术的测量数据更加准确统一, 为地球自转参数的精确测定提供了保障。根据国际地球自转和参考系服务 (IERS) 最新公布的 EOP 08 C04 序列, 目前测定地极坐标 X 、 Y 的精度已达 0.5 ~ 0.02 mas 水平, 测定自转速率变化的精度在 0.08 ~ 0.005 ms 水平。在时间分辨率方面, 已经能用 1 d 甚至 1 ~ 2 h 的观测数据求解地球自转参数值, 这些都有力地推进了地球自转研究的发展。

1990 年, 麻省理工学院 (MIT) 研究人员首次利用 VLBI 观测资料发现了潮汐波段的周日、半日地球自转信号^[10], 并提出海洋潮汐洋流是产生这些周日、半日地球自转的原因。随即而来 GIG'91 (1991 年 GPS 国际地球自转服务和地球动力学试验)、EPOCH92 (1992 年 GPS 国际联测) 以及 CONT94 (1994 年全球 VLBI 联测) 等一系列国际联测, 证实了周日、半日地球自转的存在并且可以被观测到。从此, 周日、半日地球自转变化的研究进入了与实测相互促进的阶段。

同时, 周日、半日地球自转变化的研究也推进了多学科应用向更高的精度发展。首先, 它和高精度地球章动模型的出现促成了国际天文协会 (IAU) 2000 年通过决议修改了从天球

参考系到地球参考系的转换模型^[11]。其次,它带动了美国国家环境预报中心(NCEP)和欧洲中期天气预报中心(ECMWF)把分析结果输出由1天2次(12 h 时间分辨率)改为1天4次(6 h 时间分辨率)。同时也使得空间大地测量的各种技术(VLBI, GPS, SLR)和卫星导航等把周日、半日地球自转模型作为常规的改正模型。

本文第2章将主要介绍周日、半日地球自转变化的激发机制以及主要激发因素;第3章将对近20年来的全球海潮改正模型发展作较为全面的综述;第4章是对全文的总结以及对未来研究工作的展望。

2 周日、半日地球自转变化

近几十年来,随着大气、海洋、地下水等地球物理资料越来越丰富,我们能够更深入地认识和研究地球自转运动,揭示其运动规律。地球自转速率的时变性通常用日长(LOD , 可以与 $\Delta UT1$ 相互转化)、秒长和自转角速度 ω 描述,对日长的激发研究包括几十年的长期变化、10年左右的波动、年际变化、季节性变化以及几十天的短周期变化。同时,在极移激发方面,随着资料积累和观测精度的提高,人们开始从局限于周年和Chandler极移的研究扩展到亚季节性、年际乃至几十年时间尺度上的极移研究^[12-15]。

2.1 地球自转多种时间尺度上的变化

日长包含有多种时间尺度的变化,冰期后地壳反弹和海洋潮汐摩擦作用引起地球自转的长期缓慢变化,日长几十年的准周期起伏源于地球内部的核幔耦合。季节性变化主要是因为作用于固体地球上的形状力矩和万有引力力矩,引起大气、海洋等流体与固体地球之间角动量的交换。日长在“亚季节性”(几天、几十天的准周期波动范围)到“年际”时间尺度上(几年的准周期波动范围)的变化则与大气、海洋和陆地水的大尺度运动和质量迁移密切相关。表1列出了不同时间尺度下日长的变化及其物理原因。

表1 各种时间尺度上的日长变化及其主要物理原因

时间尺度	主要激发因素
长期缓慢变化	潮汐摩擦和冰期后反弹
10年尺度波动	核幔耦合
年际变化	El Niño事件和大气平流层的准两年震荡
季节性变化	大气、海洋季节性作用,太阳和月球半年的潮汐作用
短周期变化	大气高频振荡

极移的激发过程在许多方面与引起地球自转速率变化的激发过程是不同的:后者主要受速度场影响,如受风速、洋流速度变化的激发;而极移的主要激发源是地球上物质分布的变化。长期极移的可能激发因素主要包括地壳反弹、冰期后融化和水储量的累积变化;10年尺度极移的可能激发源包括冰期后融化、水储量变化、大气和海洋等;关于Chandler摆动的激发机制,直至目前为止已经提出了包括大气、水文以及海洋和核幔耦合等动力学机制;季节

性极移则主要由大气和海洋激发。表 2 列出不同尺度极移变化及其可能的激发原因。

表 2 各种时间尺度上的极移变化及其可能的激发源

时间尺度	主要激发因素
长趋势项	地壳反弹, 冰川融化, 陆地水储量变化
10 年尺度变化	大气, 洋底压力变化, 地下水, 地震, 核幔力矩
Chandler 摆动	大气, 洋底压力变化, 地下水, 核幔力矩
季节性变化	大气, 地下水, 积雪, 海洋物质再分布
短期变化	大气, 潮汐变化, 洋底压力变化

地球自转的高频相对角动量变化主要来自大气和海洋。大气角动量变化和地球自转变化密切相关, 自 20 世纪 70 年代起就成为地球动力学研究的热点。对日长变化包括 3 个月以下的高频分量, 讨论得最多的是 40 ~ 50 d 振荡。1978 年 Zheng 等人^[16]首次发现这一变化, 他们利用光学天体测量资料, 采用 AR 谱技术发现的变化中存在一个显著的近 50 d 波动。1980 年 Feisse 等人用空间大地测量的 4 种独立 UT1 资料序列, 证实了上述发现并与大气角动量相联系^[17]。1981 年 Langley 等人用 4 年的气象资料和激光测月的日长资料, 再次证实了这一发现^[18]。李志安等人于 1987 年假设日长 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 ~ 50 d 之间^[19]。综合来看, 日长亚季节性变化的贡献主要来自大气。1993 年 Eubanks 等人研究了大气对亚季节性的极移激发, 发现大气角动量的气压项能够解释亚季节性极移的 60%^[20]。Gross 等人 2003 年的研究结果表明, 大气和海洋激发了 65% 的高频极移^[21]。但是大气角动量对 UT1 和极移的影响研究都没有进入到周日和半日频段。

虽然科学家在大气与地球自转关系的研究上取得了突破性进展, 但是洋流相对角动量和地球自转关系的研究却迟迟没有进展, 主要是因为经典著作《地球自转的变化》中, Lambeck 论证了在地转流假定下, 洋流的变化对地球自转的影响为零^[1]。他指出半日固体潮并未对地球自转产生可察觉的摄动, 因相应的惯性张量元素 (ΔI_{22} 和 ΔI_{23}) 仅作为二级影响进入激发函数, 且周日固体潮对地球自转轴方向引起很小的近周日摄动, 但对日长无影响, 仅有带 (纬向) 潮影响日长。

受此影响, 此后在地球转动惯量的变化方面, 科学家研究得比较多的是带谐潮产生的地球惯性张量变化引起的地球自转变化。如 Yoder 等人推导了振幅大于 0.002 ms 的地球自转变化^[22]; 张捍卫等人根据液核地球动力学原理, 重新推导了地球自转速率变化的理论公式, 由此明确地引入了与地球和液核的极转动惯量变化有关的液核影响因子^[23]。这两篇文章探讨的都是基于日月引潮力作用下的地球自转变化, 且 Yoder 等人的工作虽涉及了高频项, 但最高的频率只到周期为 5.6 d 的引潮力项, 也没有进入到周日和半日频带。

2.2 周日、半日地球自转变化

进入到周日和半日的高频力矩主要来自三轴地球的 $B - A$ 项。地球引力场二阶项 C_{22} 、 S_{22} 与二阶惯性张量关系为^[1,24]:

$$\begin{cases} C_{22} = -\frac{(I_{11} - I_{22})}{4M^{-1}R^{-2}} \\ S_{22} = -\frac{I_{12}}{2M^{-1}R^{-2}} \end{cases} . \quad (4)$$

地球赤道面的主惯量差与 C_{22} 、 S_{22} 关系为 (注意主惯量轴与坐标轴不重合):

$$B - A = 4MR^2 \sqrt{C_{22}^2 + S_{22}^2} . \quad (5)$$

它所造成的 UT 、极移变化为:

$$\Delta UT(t) = \frac{3GM}{8\Omega^2 R^3} \frac{B - A}{C_m} \sin^2 \theta \sin 2(\lambda - \lambda_0) , \quad (6)$$

$$\tilde{m}(t) = -\frac{0.36GM}{\Omega^2 R^3} \frac{B - A}{A} \sin 2\theta e^{-i(\lambda - 2\lambda_0)} , \quad (7)$$

式中, G 为万有引力常数, M 为地球质量, R 为地球半径, Ω 为平均自转角速度, θ 和 λ 为太阳或月亮相对于地球的余纬和经度。

由以上公式不难看出, C_{22} 和 S_{22} 激发了周期为半日的月球天平动地球自转变化, Chao 等人的理论计算表明其量级为 0.06 mas 左右^[24]。此外, 由于地球液核和核幔边界近似于椭球面, 旋转地球将产生一个自转逆向简正模, 导致液态地核的近周日自由摆动。孙和平等人采用武汉和全球地球动力学计划 (GGP) 的共 18 台超导重力仪 (SG) 观测资料, 在有效消除海洋、大气和台站周围环境因素干扰的基础上, 研究了液核的共振放大现象, 解算了地球自由核章动共振参数^[25]。

以上所说的影响因素只激发了小部分的周日、半日地球自转变化。20 世纪初期, 随着 GPS 和 VLBI 等多种空间观测技术的发展, 从高精度以及高分辨率的地球自转参数 (极移和 $UT1$) 中检测到明显的周日、半日变化。与海潮模型所预测的结果进行比较, 在主要的周日、半日潮波频率上, 两者的振幅和相位符合得比较好, 尤其是对 $UT1$ 。据此认为, 这些周日、半日变化主要是固体地球对海洋潮汐洋流作用的响应, 这也是目前关于周日、半日地球自转激发因素的主流观点。海潮对极移和地球自转速率变化的激发见式 (3)^[5,26]。

基于高精度和高分辨率的地球自转数据, 1990 年 Dong 等人首次提出海洋潮汐洋流是产生周日、半日地球自转变化的主要因素^[10]。随后, 许多学者都针对海洋潮汐对周日、半日地球自转的影响这一问题展开了研究。Chao 等人 1996 年的研究表明, 海洋潮汐洋流对 $\Delta UT1$ 周日、半日变化的贡献约为 90%, 此外, 还有大气潮、三轴地球以及非潮汐海洋等因素的影响; 而海潮洋流对极移周日、半日变化的贡献约为 60%, 此外, 还有大气潮、三轴地球、核幔边界的二阶球谐分量以及地震等影响因素^[27,28]。但是, 根据目前的研究结果, 以上这些因素还不足以解释剩下的周日、半日极移, 真正的答案还有待学者们进一步的探寻。

3 海洋潮汐改正模型

弄清楚了周日、半日地球自转变化的激发, 就可以建立模型对这一部分进行改正, 周

日、半日地球自转变化的改正模型也称为海洋潮汐改正模型。20 世纪 80 年代以来, 欧洲的 VLBI 网、美国的 VLBA 阵、日本的空间 VLBI 相继投入使用, 这些是新一代射电望远镜的代表, 它们的灵敏度、分辨率和观测波段都大大超过以往的望远镜。1994 年进行了第一次全球 VLBI 联测, 且从 2002 年开始, 每隔 3 年就要举行一次联测。同时, 经过 20 年的发展, GPS 观测技术也取得巨大进展。1991 年, 国际上组织了第一次 GPS 国际地球自转服务和地球动力学试验的国际联测, 取名为 GIG'91, 也促进了国际地球动力学服务 (IGS) 的成立; 紧接着 1992 年又进行了一次全球 GPS 联测。1992 年 8 月 10 日, 美国航天局、法国国家空间研究中心以及法国航天局联合完成了 TOPEX/Poseidon 的卫星发射任务, 该卫星的主要目的是从太空精确测量全球海面表面形状, 进一步准确确定大洋环流模式, 改善对海洋潮汐、大地水准面以及岩石圈结构、地幔活动性等的认识。一系列的国际联测和卫星测量活动推进了人们对海洋的了解与研究。

3.1 典型海洋潮汐改正模型

依托 VLBI、GPS 高精度以及高分辨率的地球自转参数数据, 和 TOPEX/Poseidon 卫星的高精度测高数据, 自 1994 年以来, 先后有超过 20 多个全球海洋潮汐改正模型被建立。以下简要介绍其中有代表性的 3 种。

Herring 等人结合 8 年的周解 VLBI 数据, 采用 Alias 方法建立了 HD94 模型, 同时分别运用了卡尔曼滤波、正弦拟合以及直接参数估计方法, 对 $\Delta UT1$ (O_1, K_1, M_2, S_2) 和 PM ($O_1, K_1, P_1, M_2, S_2, K_2$) 的主要周日、半日潮汐项进行了振幅和周期估计, 进一步确认了海洋潮汐洋流对周日、半日地球自转变化的主要影响作用^[28]。

Gipson96 模型则采用较长的 VLBI 序列估计了 41 个 $UT1$ 潮汐项和 56 个极移潮汐项。但是, 在估计这些潮汐项时要求比较长的 VLBI 序列 (通常需要长于 18.6 a 的数据), 否则无法分解开这些相互关联的潮汐项参数^[29]。Gipson 还通过一种边瓣约束方法, 针对几个主要潮汐项的边瓣进行了分解和估计:

$$\frac{a_{j'}}{a_j} = \frac{V_{j'}}{V_j}, \quad (8)$$

式 (8) 中, a_j 表示潮汐项主瓣 j 的模型系数, $a_{j'}$ 代表与 j 对应的边瓣 j' 的模型系数, V_j 和 $V_{j'}$ 则分别表示主瓣 j 和边瓣 j' 的振幅。同时, Gipson 将该解与 VLBI 约束解进行对比, 结果表明, 增加了边瓣约束的 VLBI 解同 SLR 测量结果以及海潮预报值符合得更好, 显示了分解估计边瓣的必要性。

Rothacher 等人运用 3 年 (1995—1998 年) 的 2 h GPS 数据估计了 41 个 $UT1$ 潮汐项和 57 个极移潮汐项^[30]。需要指出的是, GPS 卫星对绕 Z 轴的旋转不敏感, 不能直接估计 $UT1$, 而只能获取它的变化量 ΔLOD , 因此对 $UT1$ 潮汐项的估计是通过 ΔLOD 的估计积分而来, 且由于 GPS 的运行周期接近 12 h, 其轨道误差会呈现 12 h、24 h 的周期变化; 这对估计地球自转的周日、半日变化会不可避免地带入误差, 这也是 GPS 数据解算 $UT1$ 和极移周日、半日潮汐改正模型的关键问题。

总结起来, 由海洋潮汐洋流引起的地球自转周日、半日变化可以用下面的多谐波函数来表示:

$$\Delta X_P = \sum_{j=1}^n -p_j^c \cos \varphi_j + p_j^s \sin \varphi_j, \quad (9)$$

$$\Delta Y_P = \sum_{j=1}^n p_j^c \sin \varphi_j + p_j^s \cos \varphi_j, \quad (10)$$

$$\Delta UT1 = \sum_{j=1}^n u_j^c \cos \varphi_j + u_j^s \sin \varphi_j, \quad (11)$$

$$\varphi_j = a_j l + b_j l' + c_j F + d_j D + e_j \Omega + f_j (\theta + \pi), \quad (12)$$

式(9)–(12)中, n 为潮汐项改正项数, φ_j 是相位角, $p_j^c, p_j^s, u_j^c, u_j^s$ 为潮汐改正模型参数, $l, l', F, D, \Omega, \theta$ 是日月基本参数。

Shum 等人从众多的海潮改正模型中选取了 10 多个模型进行精度评估^[31], 表明这些海潮模型都带有特定的区域有效性, 即在深海区域精度符合较好 (2 ~ 3 cm), 在浅海区域则符合得较差。同时揭示了当前海潮模型的重要跨学科应用, 不仅是在卫星测高领域, 还包括了大地测量学、地球物理学、海洋学和卫星轨道测定等方面^[32–40]。此外, 2011 年德国波恩大学的 Böckmann 博士在他的博士论文以及系列出版文章中也介绍了相关工作^[41–44], 进一步更新了海潮模型。他一方面根据最新的 VLBI 观测数据解算得到高分辨率 (1 h) 的地球自转数据, 另一方面还首次运用转换法方程组的方式建立了周日以内的潮汐改正模型。

这些潮汐改正模型采用不同的方法对地球自转主要的周日、半日潮汐项进行了估计和预报, 不同模型在 UT1 的周日、半日变化参数估计上的差别较小, 大约为几 μs , 而不同模型对 PM 的周日、半日变化参数估计差别较大, 大约为 10 ~ 30 μas ^[45,46]。

3.2 目前的海洋潮汐改正模型

潮汐现象非常复杂, 用严格的数学模型进行描述是十分困难的事情。早期的海潮模型是利用沿海验潮资料基于流体力学模型建立的, 如 Schwiderski 海潮模型。随着空间观测技术的进步, 近年来卫星测高技术发展迅速, 获得了全球水面地形数据, 为精确的全球海潮改正模型研究奠定了基础, 如国际上常用的 CRS 4.0 海潮模型等相继出现。但是, 由于缺少海潮资料等原因, 许多 GPS 精密定位软件实际上并没有顾及海潮改正, 目前美国麻省理工学院 (MIT) 研制的高精度 GPS 分析软件 GAMIT/GLOBK 已加入海潮改正。

进入 21 世纪, 在已有模型基础上发展出新的潮汐模型。目前应用比较广泛的是 IERS conventions 2010 中收录的 Eanes2000 模型^[47], 该模型基于 Ray 1994 模型发展而来^[32], 模型由 41 个周日波和 30 个半日波组成, 包括 30 个主要周日、半日潮波改正项, 以及 41 个边瓣潮波改正。与 IERS conventions 1996 年中记录的模型相比较, 新模型的精度已有很大提高, 对极移 PM 和 UT1 分别达到 100 μas 和 10 μs ^[48,49]。

但是, 目前的海潮改正模型仍存在一定的误差, 约 10%~20%^[50], 这些误差会影响一些高精度的应用。如海潮改正模型误差对全球卫星导航系统的影响, 主要体现在模型中的近周日以及半日改正项误差与卫星的运行周期 12 h 相互耦合, 难以分解或抵消, 从而影响定轨精

度。IERS 海潮改正模型中 0.1 mas 的误差就会造成相当于地球表面 3 mm 的位移误差, 同时, 实验数据表明, 对于近海地区较短时段的 GPS 观测, 考虑海潮负荷改正可以明显地提高解算精度, 特别对改善高程方向的精度贡献明显。这种影响的量级对水平方向不明显, 对高程方向的影响可达数厘米, 因此对于高精度的 GPS 测量来说这种影响是不容忽视的。

4 总结与展望

由于空间大地测量技术提供了高精度和高时间分辨率的地球自转变化数据, 同时结合了气象学、海洋学、地震地质学等多学科的知识 and 观测数据, 使得地球自转变化的研究有了非常广泛和深入的发展, 特别是在大气与地球自转关系的研究上取得突破性进展。然而, 在海洋对地球自转变化的激发作用研究上所取得的成果离问题的完全解决还有很大距离。目前的研究结果表明, 海洋潮汐洋流是周日、半日地球自转变化的主要激发因素, 它激发了 90% 左右的日长变化和 60% 左右的极移; 此外, 还有 30% 的周日、半日极移激发因素没有确定。随着测量手段的发展, 高精度测量数据的获得以及多种空间观测技术的综合, 人们能更细致地区分地球自转周日、半日变化信号, 未来对地球自转变化的研究也会进入到更高更深的层次。

潮汐现象促使海水质量重新分布, 从而产生海洋潮汐的附加位, 这一附加位的变化也会引起地面测站的变形, 特别是在近海地区, 这一变形在垂直方向的瞬时位移可达数厘米, 对于高精度的空间大地测量来说这种影响是不容忽视的。目前, 一方面关于周日、半日地球自转变化的理论框架还没有全面建立, 且已有的海潮改正模型还存在 10%~20% 的误差; 另一方面, 现有的空间大地测量技术都存在模糊度, 如 VLBI 能精确观测所有的地球自转参数, 但是观测数据稀少且对坐标系原点不敏感, 而 GPS 布点简便, 拥有丰富的观测数据, 却对坐标系的旋转尤其是绕 Z 轴的旋转不敏感, 阻碍了全球海潮改正模型的精度提高。在今后的研究工作中, 可以考虑综合多种空间技术 (VLBI 与 GPS) 的观测结果展开研究, 这些技术相互弥补, 可以降低随机误差; 其次可以采用一种高度相关理论, 来分解潮汐改正模型中的主瓣和边瓣, 进一步精化海洋潮汐模型, 并完善周日、半日地球自转变化理论。

参考文献:

- [1] Lambeck K. The Earth's variable rotation. Cambridge: Cambridge University Press, 1980: 87
- [2] Zhou Y H, Chen J L, Salstein D A. Geophysical Journal International, 2008, 174: 453
- [3] Chao B F, Yan H M. JGR, 2010, 115: B10417
- [4] Yan H M, Chao B F. JGR, 2012, 117: B02401
- [5] Gross R S. Physical Geodesy, 2007, 11: 7
- [6] Thomas D V. Nature, 1964, 201: 481
- [7] Rochester M G, Jensen O G, Smylie D E. Geophys.J.R. Astr.Soc, 1974, 38: 349
- [8] Toomre A. Geophys. J.R. Astron.Soc, 1974, 50: 335

- [9] Sasao T, Wahr J M. *Geophys. J.R. Astron.Soc*, 1981, 64: 729
- [10] Dong D N, Herring T A. *EOS Trans Am. Geophys. Un*, 1990, 71: 482
- [11] Capitaine N, Gambis D, Dennis D, et al. *IERS*, 2002, 29: 37
- [12] Zheng D W, Ding X L, Zhou Y H. *Chinese Science Bulletin*. 2000, 45: 2231
- [13] Zhong M, Isao N, Akio K. *JGR*, 2003, 108: 2057
- [14] Zhou Y H, Salstein D A, Chen J L. *JGR*, 2006, 111: D12108
- [15] Gross R S, Fukumori I, Menemenlis D. *JGR*, 2004, 109: B01406
- [16] Zheng D W. *Chinese Astron. Astrophys*, 1979, 3: 114
- [17] Feissel M, Gambis D. *C R Acad Sc Paris*, 1980, 291: 271
- [18] Langley R B, King R W, Shapiro II, et al. *Nature*, 1981, 294: 730
- [19] 李志安, Wilson C R. *天文学报*, 1987, 28: 29
- [20] Eubanks. *Variations in the orientation of the earth*. Washington, D.C: University of Washington, 1993: 45
- [21] Gross R S, Fukumori I, Menemenlis D. *JGR*, 2003, 108: B2370
- [22] Yoder C F, Williams J G, Parke M E. *JGR*, 1981, 86: 881
- [23] 张捍卫, 郑勇, 杜兰, 等. *云南天文台台刊*, 2003, 2: 60
- [24] Chao B F, Dong D N, Liu H S, et al. *Geophys. Res. Lett*, 1991, 18: 2007
- [25] 徐建桥, 孙和平. *自然科学进展*, 2002, 12: 70
- [26] Dickman S R. *Geophys. J. Int*. 2005, 161: 33
- [27] Herring T A, Dong D N. *JGR*, 1994, 99: 18051
- [28] Chao B F, Ray R D, Egbert G D. *JGR*, 1996, 101: 20151
- [29] Gipson J M. *JGR*, 1996, 101: 28051
- [30] Rothacher M, Beutler G, Weber R, et al. *JGR*. 2001, 115: 13711
- [31] Shum C K, Woodworth P L, Andersen O B, et al. *JGR*. 1997, 115: 25173
- [32] Ray R, Sanchez B, Cartwright D. *AGU*. 1994, 75: 108
- [33] Egbert G, Bennett A, Foreman M. *JGR*, 1994, 99: 24821
- [34] Schrama E, Ray R. *JGR*, 1994, 99: 24799
- [35] Andersen O. *JGR*, 1995, 100: 25249
- [36] Desai S, Wahr J. *JGR*, 1995, 100: 25205
- [37] Kantha L. *JGR*, 1995, 100: 25283
- [38] Matsumoto K, Ooe M, Sato T, et al. *JGR*, 1995, 100: 25319
- [39] Sanchez B, Pavlis N. *JGR*, 1995, 100: 25229
- [40] Eanes R, Beuadpur S. *Dissertation*. Austin: Univ. of Tex, 1996: 35
- [41] Böckmann S, Artz T. *Dissertation*. Germany: Institute of Geodesy and Geo-information University of Bonn, 2011: 87
- [42] Böckmann S, Artz T, Nothnagel S, et al. *JGR*, 2010, 115: B05404
- [43] Böckmann S, Artz T, Nothnagel, S. *J Geod*, 2011, 859: 565
- [44] Bernhard, Artz T, Nothnagel L, et al. *J Geod*, 2011, 86: 230
- [45] Ray R, Steinberg D, Chao B, et al. *Science*, 1994, 264: 830
- [46] Chao B F, Ray R D, Egbert G D. *Geophys. Res. Lett*. 1995, 22: 1993
- [47] Eanes R. *personal communication*, 2000
- [48] Dickman S R, Gross R S. *J. Geod*, 2010, 84: 457
- [49] Gerard P, Brian L. *IERS Conventions*. 2010, 37: 125
- [50] Ray J, Griffiths J, Collilieux X, et al. *Geophys. Res. Lett*. 2013, 40: 5860

Progress in Research on Diurnal and Semidiurnal Earth Rotation Change

XU Xue-qing^{1,2,3}, DONG Da-nan², ZHOU Yong-hong^{1,2}

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. School of Information Science Technology, East China Normal University, Shanghai 200241, China; 3. Key Laboratory of Planetary Sciences, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China)

Abstract: We mainly focus on the progress of research on high frequency changes in the earth rotation. Firstly, we review the development course and main motivating factors of the diurnal and semidiurnal earth rotation change. In recent decades, earth orientation has been monitored with increasing accuracy by advanced space-geodetic techniques, including lunar and satellite laser ranging, very long baseline interferometry and the global positioning system. We are able to obtain the Earth Rotation Parameters (ERP, polar motion and rotation rate changes) by even 1 to 2 hours observation data, from which obvious diurnal and semidiurnal signals can be detected, and compare them with the predicted results by the ocean model. Both the amplitude and phase are in good agreement in the main diurnal and semidiurnal wave frequency, especially for the $UT1$, whose compliance is 90%, and 60% for polar motion, there are 30% motivating factor of the diurnal and semidiurnal polar motion have not been identified. Then we comprehensively review the different types of global ocean tidal correction models since the 1980s, as well as the application research on diurnal and semidiurnal polar motion and $UT1$, the current ocean tidal correction models have 10% to 20% uncertainty, and need for further refinement. Finally, the future work of the diurnal and semidiurnal earth rotation are briefly discussed.

Key words: Earth rotation; diurnal and semidiurnal changes; length of day change; polar motion; global ocean tidal correction model