第 22 卷 第 1 期 天 文 学 进 展 Vol.22, No.1
2004 年 3 月 PROGRESS IN ASTRONOMY Mar., 2004

文章编号: 1000-8349(2004)01-0023-12

国内天文地球动力学中的潮汐研究

萧耐园, 夏一飞

(南京大学 天文系, 南京 210093)

摘要: 简要说明了天文地球动力学范畴内所研究的潮汐现象, 包括由日月引潮力引起的固体潮、海洋潮、大气潮和由于地球自转轴的极移引起的极潮, 以及这些潮汐对地球自转和地球自转的测量产生的效应。重点阐述中国天文学界在这一领域里的研究成果。这些研究涉及潮汐影响地球自转的机制, 也就是各种潮汐效应与极移、自转速率变化和章动的关系, 包括构建这类关系的理论模型, 分析潮汐对它们的影响, 利用中国古代丰富的天象记录计算地球自转的长期减慢, 计算弹性或滞弹地球的洛夫数, 依据某一地球模型计算潮汐效应或章动序列等等。研究也涉及在测量地球自转参数的不同技术中各种潮汐效应对测量结果产生的影响及其改正, 并涉及与潮汐有关的观测方法的优化和数据处理过程的改进。最后介绍了中国学者所发现的脉冲星的周期和周期变率测量中的潮汐效应, 尽管它们的量级甚微, 但不容忽视。

关 键 词: 天体测量学; 日月潮汐; 极潮; 综述; 地球自转变化; 地球自转测量

中图分类号: P183.3 **文献标识码**: A

1 引 言

由于固体地球是一个弹性体 (严格地说是一个滞弹体), 其表面覆盖着海洋和大气层, 后两者均是流体, 当地球处于一个变化着的力场中时, 会产生形变, 从而引起密度改变和物质的流动。这种现象通称为潮汐。

1.1 日月潮和固体极潮

日、月引潮力的作用会引起固体地球、海洋和大气发生潮汐形变和物质迁移, 潮汐高度的变化引起地球质量重新分布, 从而改变地球的惯性张量。伴随着的潮汐流动产生了相对于固体地球的相对角动量。日月引潮力作用产生的固体地球的形变称为固体潮。固体地球的形变还能产生于海洋潮和大气潮的质量负荷, 这称为负荷潮 [1] 。

地球自转产生的惯性离心力的任何变化作用于弹性地球, 也引起地球形状和密度分布的改变, 从而导致测站位移和形变附加势。自转离心力的变化起因于自转矢量的变化, 其中方向

收稿日期: 2003-01-02 ; **修回日期**: 2003-05-08 ; 特约稿

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10133010)

改变的效应称为固体极潮，在潮汐效应中起主要作用；相比之下，自转速率变化的相对变率影响要小得多[2,3]。

1.2 潮汐对地球自转及地球自转参数测定的影响

如果相对于一个空间惯性参考架，例如由国际地球自转服务 (IERS) 定义的国际天球参考架 (ICRF) 来描述地球自转矢量在空间的运动，就得到与日月潮汐有关的章动 (包括岁差)。当涉及地球自转的潮汐效应时，还可以研究地球自转矢量相对于地固参考架的变化。目前习用的这种参考架为由 IERS 定义的国际地球参考架 (ITRF)[4]。地球自转矢量在地固参考架里的极向分量即自转速率等价于日长 (LOD)，赤道分量称为极移，用地极坐标表示。地球自转矢量的变化表现为地极坐标并非常量，且日长也逐日变化。地极坐标和日长变化通称为地球自转参数 (ERP)。极移与章动有确定的转换关系，即通过表示地固坐标系相对于天球坐标系之间关系的欧拉角所进行的转换。当日月潮汐导致地球惯性张量的变化和相对角动量发生时，就会影响地球自转，在极移中产生与潮汐有关的分量并引起自转速率的相应变化[5]。

潮汐效应不仅造成 ERP 本身的改变，也对 ERP 的测定产生影响。在经典天文观测中，日月引潮力使测站的铅垂线方向 (即天顶点) 偏移，也使地方子午线方向改变；潮汐效应混杂于周期观测误差中不易分离，削弱了观测结果的精度。在现代天文观测中，潮汐形变 (固体潮和负荷潮) 使测站既产生垂直位移，又产生水平位移，从而改变了它在 ITRF 中的坐标。潮汐形变和物质迁移又使地球的引力势发生变化 (称为地球形变附加势)，对人造卫星的轨道产生摄动，从而影响现代空间技术的观测结果。

1.3 日月潮及其效应

地球上一点所受的日月引潮力与天体 (月球或太阳) 到该点的距离和对该点的天顶距，以及天体到地心的距离有关。通常把该点所受引潮力的作用函数表示为引潮力势。引潮力势可用多项式展开，常用的有勒让特展开式、拉普拉斯展开式和杜德森展开式。这 3 种展开式以不同的参量为自变量，各有特点。例如，引潮力势的二阶拉普拉斯展开式很明显地显示了引潮力势在地球表面的几何分布和随时间的变化规律，由此把引潮力分为带谐潮、田谐潮和扇谐潮。带谐潮各分量具有 1 d 以上直至 18.6 yr 的变化周期，田谐潮和扇谐潮的变化周期分别为近周日和近半日。杜德森展开式通过月球和太阳的运动参数把日月引潮势分解为各分潮波，它们的变化直接表示为时间的函数[6]。

已经证明日月潮中的田谐潮产生引潮力矩的赤道分量，在地球的极移中产生近周日项，相对于空间参考架表现为天极的章动。带谐潮产生引潮力矩的极向分量，它引起地球自转速率作相应周期的变化。扇谐潮则与因潮汐引起的地幔耗散有主要的关系。

固体潮引起地面测站位移和地球的形变附加势。地面上一点产生的垂直位移 u_{r} 和水平位移 u_{Φ}、u_{λ} 通过勒夫数 (h 用于计算垂直位移，l 用于计算水平位移) 与日月引潮力势来计算。在计算测站位移改正时，通常对月球计算至其引潮力势的 3 阶，对太阳计算至 2 阶。在日月引潮力势的作用下，一个测站的垂直位移可达 30~40 cm，水平位移为几厘米。

形变附加势通过第三个勒夫数 k 来计算。对一颗轨道较低的人造卫星来说，因日月潮汐引起的地球形变附加势的摄动可达日、月直接摄动的 15%。

地球表面的海洋内覆盖着一定厚度的海水，这层海水对弹性地幔产生负荷[7]。负荷的大小因海潮涨落而随时间变化，这一变化导致地面的弹性形变，从而引起测站位移和地球的形

变附加势。在计算海潮效应时要就整个地球表面所有海洋的海潮高度的变化进行计算，这时需应用一定的全球海潮模型 (如 Schwidersky 模型 [8] 、 CRS3.0 模型 [9] 和 GOT99.2 模型 [10] 等) 以及格林函数。海潮负荷变化引起的测站位移在径向可达数厘米，而水平向仅为数毫米。

海潮的另一个著名效应是由潮汐摩擦引起的地球自转长期减慢。这种摩擦包括海水与浅海底的潮汐摩擦以及滞弹地球潮汐形变所产生的内摩擦。与之伴随的现象是月球的长期加速和月地距离的增大。

大气的潮汐涨落也会引起弹性地幔的负荷变化。自然，它的效应比海潮效应要小得多，对于一个测站仅改正由此效应产生的径向位移，其范围在毫米至亚毫米量级。这项改正通过以测站为中心、 2000 km 为半径的范围内所测得的气压的归算求得 [11] 。

1.4　极潮及其效应

极潮产生于地球瞬时自转轴的移动 (即极移) 而造成的自转离心力的变化。这种变化着的离心力作用于弹性地幔，引起地球形变，称为固体极潮。固体极潮导致测站位移并产生形变附加势。与日月固体潮类似，引入勒夫数可求得位移。由于效应较小，只应用 2 阶勒夫数，由此引起的位移垂直分量可达厘米级。同样，通过勒夫数 k 可求得形变附加势。由极潮引起的海洋水体的形变称为海洋极潮。

1.5　潮汐的天文学研究

在地球物理学界，潮汐的研究是一个很重要的分支，不仅建立起了各种精确的理论模型，还应用精密的重力仪、水平摆、倾斜仪和伸缩仪等仪器来测定固体潮效应。在天文学中，潮汐的研究首先在于消除对观测结果的影响。早在 20 世纪 80 年代以前，经典天文仪器如中星仪、等高仪、照相天顶筒等的测量中，已需要加入因固体潮引起的铅垂线和子午面的偏移。现代天文测量新技术，如甚长基线干涉测量 (VLBI) 、全球定位系统 (GPS) 、人造卫星激光测距 (SLR) 、月球激光测距 (LLR) 等的精度已达毫角秒甚至亚毫角秒量级，因此必须精确地改正由固体潮引起的各种效应，例如测站位移和人造卫星的潮汐摄动。改正模型的精确性和地球物理参数的精度将直接影响天文测量的精度。反之，分析天文观测的结果也可以检验和改进固体潮的理论模型以及确定相应的参数值。例如，通过对实测的 EOP 序列的分析来求取勒夫数，就是天文方法研究固体潮的一种途径。此外从经典天体测量结果来分析地方铅垂线偏离，也可以研究固体潮。另一方面，对于给定的地球模型，可以从理论上计算地球在日月作用下的潮汐形变及其伴随的固体潮效应，天文观测值与理论值的比较可以深化对地球内部构造的研究。

我国天文工作者在上述几个方面，即既在潮汐效应机制研究，又在潮汐与地球自转参数测量这两个领域做了相应的工作，并取得了一定的成果。此外，他们还发现了潮汐效应对测量脉冲星的周期和周期变率的影响。

2　天文地球动力学中潮汐效应的研究

2.1　日月潮汐与章动

在 IERS 的 2000 规范提出之前，从 1984 年起国际上应用的是 Wahr 提出的弹性液核地

球的章动序列[12]。我国学者从理论上研究了这一模型，指出周日潮汐因子在数值上有系统性的偏小，并表现出模型计算的液核自由章动 (FCN) 的理论值与天文观测所得的实测值有差异[13,14]。实测资料的分析也证实了这一点[15,16]。

李国营[17]研究了对这一模型的改进：利用扰动方法和张量正则分量的广义球谐函数展开方法，把弹性、球形、横向不均匀地球的潮汐模拟理论拓广到任意结构和零阶扰动中包含任意多阶球谐函数的一般情形，从而建立了粘弹性、球形、任意参数分布的地球模型潮汐理论。应用更精确的 PREM 地球模型和不同的计算方法，夏一飞等人[18]计算了章动序列。考虑具有海洋和大气的非刚体地球，Huang 等人[19]根据上述模型计算了 343 个周期、包括黄经和交角章动的正相和反相部分的章动序列。随后，一套考虑日月引潮力势 4 阶项的岁差章动力矩被推导出来，用于精确分析岁差章动和极移等日月潮效应[20]。

为了研究微椭弹性地球的章动和潮汐理论，在 1 阶扁率近似下，将椭球形参考边界上一个有关形变的连续量转化到等效球面上作广义面球谐函数展开进行标量化，可导出标量常微分形式的边界条件[21]。当前对非刚体地球章动的理论和观测研究已要求必须考虑 2 阶项效应。在上一工作的基础上，与位移有关的连续量和所有的边界条件都由 2 阶扁率导出[22]。

2.2 日月潮汐与极移

通过解自转极、角动量极和形状极的自由摆动方程，以及在日月引潮力作用下它们的受迫摆动方程，我们分别研究了弹性地球[23]和液核弹性地球[24]参考极的运动几何图像和它们的相互关系。

关于极移中的 Chandler 周期，朱耀仲[25]首次对滞弹地球导出了其 Q 的理论值，表明地幔滞弹性可能是其最主要的能量耗散源。另外，他还讨论了地幔弹性对弹性地球的平衡极潮的扰动及其对 Chandler 摆动 (CW) 周期和 Q 值的影响。计算结果表明，平衡极潮的滞弹扰动对 CW 的影响远比极潮中非平衡部分的影响大[26]。

对自 1900 年以来的极移资料的分析揭示了 CW 周期和振幅的变化过程，证实了周期与振幅相关，振幅变大时，周期变长，这可能由非平衡极潮引起[27]。在极移的研究中引入复小波变换，对小波变换的振幅和位相的变化分别作分析后发现，极移相位的高频变化存在 11.9 、14.9 和 29.58 d 的周期，这主要是由月球潮汐所致[28]。

2.3 日月潮汐与地球自转变化

利用 PREM 地球模型所给的物质密度和弹性等参数分布，我们计算了日月引潮势产生的地球形变附加势和转动惯量的变化，得到一系列振幅大于 1 μs 的地球自转变化的周期项，其周期等同于相应的引潮势带谐项[29]。在上述关于弹性地幔工作的基础上，我们还进一步考虑到地幔的滞弹性，计算了地球自转的长期减慢加速度和周期变化的世界时变化序列[30]。

更多的工作在于利用世界时的实测资料分析其变化。这种分析的目的，一是了解测时结果的精度，以便找出缺陷加以改进。对中国的时间服务发布的世界时的分析发现，在测时结果的处理中过度平滑[31,32]；二是从测时结果求取与地球形变有关的带谐潮参数 k/C (k 是勒夫数，C 是地球极转动惯量)。通过利用中国 8 架仪器的长期测时资料、BIH 的日长变化序列和国际地球自转服务的世界时序列，我国一些学者求得了彼此相当一致的结果[33~35]。

2.4 日月潮汐与地球自转的长期减慢

许多工作致力于从历史上的日月食和月掩星、月犯星资料来计算地球自转的长期减慢加

速度。韩延本等人[36] 利用中国史书中从春秋至唐代初年 1400 余 yr 的中心食记录求出了相对加速度的平均值。李致森和杨希虹[37] 收集了从汉初至明末近 2000 yr 间日食 87 例、月食 72 例的记录，求出了相对加速度，并发现减速度也不是常数，呈普遍下降的趋势。选取中国公元 600 年以前的 83 yr 月掩星记录，刘次沅[38] 使用其本人提出的“实际可见时间段”(即“时间窗”) 方法，首次利用这些未载时刻的记录得到地球自转长期加速平均值。吴守贤和刘次沅[39] 对自 20 世纪 20 年代以来利用古代交食观测记录研究地球自转长期变化的结果和存在问题作了评述，并对不同作者得到的不同形式的结果作了统一处理，得到 3000 yr 来地球自转长期加速度平均值和月球潮汐加速值。利用巴比伦月食，中国的日、月食，阿拉伯日、月食，欧洲日、月食和望远镜观测的日、月食及月掩星记录，在统一了资料的系统后，谢丽琳和赵铭[40] 求出了 3000 yr 尺度内的 ΔT $(= ET - UT)$ 值，进而求出了平均相对加速度。利用中国古代 9 世纪以前的 732 条月掩星记录，以“时间窗”方法，吴守贤和刘次沅[41] 再一次求得地球自转加速度平均值。这一工作填补了公元 3 至 8 世纪的资料弱环，并证实了公元 5 世纪前后地球自转非潮汐项存在的显著变化。

当代激光测月和激光测卫资料也被用来研究月球的潮汐加速。许华冠和金文敬[42] 用 1970~1987 年 (共 17 yr) 的全球 LLR 资料求得了月球平黄经的长期加速，且与其他方法所得值符合良好。朱元兰和冯初刚[43] 用 1983~1994 年 (共 11 yr) 的全球 SLR 资料，解算潮汐参数进而求得月球平均运动的长期变化，这与由 LLR 得到的结果非常一致。同时他们还求得日月潮汐引起的地球自转的长期变化。

3　潮汐与地球自转测量

3.1　经典光学测量中日月潮汐效应的改正

经典光学测量是指用中星仪测时间、天顶仪测纬度以及丹容等高仪和光电等高仪测时间和纬度等。这些测量的基准是测站的地方铅垂线。在日月引潮力作用下一般测站地方铅垂线方向会发生周期性摆动，这易用理论公式改正。

利用上海天文台光电等高仪 1974~1981 年的观测资料，杨志根[44] 解算了海潮 M_2 波对上海天文台时间和纬度的影响。利用 Schwiderski 的大洋潮图和我国近海的局部潮图，许厚泽等人[45] 对我国 6 个天文台站的时纬负荷改正作了估算，得出的量级为几毫角秒。夏炯煜[46] 关于固体潮垂线变化对经典天文时纬观测改正和计算固体潮改正理论值可能达到的精度作了全面讨论。钱昌夏[47] 通过对上海天文台光电中星仪 1984~1985 年观测的分析，得到了中星仪方位角与以温度、纬度方向的固体潮、海潮改正为变量的多元回归方程。

在测定上海与平壤间的经度差时，除了加上通常的固体潮改正、海潮改正以外，还需加上带谐潮引起的地球自转短周期变化的改正[48] 。郭丰美和李劲峰[49] 通过对中国沿海各验潮站的资料分析，发现中国沿海海平面呈现以 yr 为周期的变化，且具有地区特性，变化振幅平均可达 20 多 cm，并求得 Sa 波的海潮图和 Sa 波对我国各天文台站测时和测纬的影响。

3.2　新技术测量中日月潮效应的改正

20 世纪 80 年代初中国开始运用和实现各种 ERP 测量新技术，同时开始了关于新技术测

量中潮汐效应改正的研究。金文敬等人[50] 研究了固体潮与海潮对 LLR 测量的影响，给出了计算这些影响的公式，并估计了在地球上不同地点、月球和太阳在不同位置时影响的大小。同时，他们对 LLR 测量中月潮的影响也作了研究，给出了月潮的计算公式，列出了月面上 4 个反射器在不同地月距离和测站相对月球不同位置时的月潮值表，并估计了此值对测定 $UT0$ 的影响[51]。另外，他们还研究了在 VLBI 测量中固体潮和海潮 M_2 波的影响，给出了相应的计算公式，估算了月球和太阳在不同位置时固体潮和海潮对不同基线的影响[52]。夏一飞等人[53] 讨论了固体潮和固体极潮对 VLBI 测量的影响，给出了具有明确物理意义和能达到高精度的计算公式，并讨论了这类改正以及测定 Love 数与基线配置的关系。

毛爱林等人[54] 深入地探讨了海洋负荷潮对新技术测量的影响，发现 Schwiderski 全球海潮图对中国近海的模拟并不令人满意，同时近海海潮的负荷潮效应十分强烈，所以他们收集了中国近海海潮资料来计算中国 VLBI 站的海洋负荷潮参数，并讨论了其计算方法。朱进和夏一飞[55] 提出了一个与时间无关的海潮负荷对台站位移影响的公式，并对计算程序也作了改进。杨志根等人[56,57] 则专门讨论了日本海的海潮对东南亚 VLBI 站位移的影响，计算了日本海的 4 个主潮波对东亚 9 个 VLBI 站的负荷位移参数和重力改正，进而估算了各基线的负荷变化，同时用球谐函数方法计算了由 Schwiderski 海潮图和日本海潮图引起的 4 个分潮波的综合潮负荷参数，并讨论了对海潮模型精度的一般要求。

近年来周旭华等人对新的 CSR4.0 全球海潮模型结果作了讨论。他们采用这一海潮模型并顾及中国近海海潮图，不仅计算了海潮中 8 个主要潮波引起的中国地壳运动观测网中测站的海潮位移改正，而且还用实测 GPS 数据检核出海潮对 GPS 基线向量的影响，并讨论了海潮模型和格林函数对海潮位移改正的影响[58]。此外，他们又以精确的全球数字地图作为海陆边界划分，采用 Farrell 由 Gutenberg 平均地球模型所求得的格林函数，再次计算了中国测站的海潮位移改正，弥补了 IERS 规范中对多数中国测站位移的缺失。他们的结果与列入 IERS 规范的中国测站的结果相比，两者符合得很好[59]。

3.3 天文测量中极潮效应的改正

1985 年，在国际上提出天文测量中极潮效应改正的同时，我国学者也独立地提出了这一课题。他们推导了地球自转离心力势变化引起的弹性固体地球的地面点位移和形变附加势，给出了相应的改正公式[3]；计算了中国的 VLBI 测站的固体极潮位移改正，讨论了其变化规律[53]；分析了自转变化引起的极潮效应产生的测站位移随纬度的变化，以及极移的极潮效应随不同经度的分布，计算了中国与国外若干 VLBI 站组合的固体极潮引起的基线变化，进一步讨论了海洋极潮产生的负荷所引起的测站位移[60]。

4 地球自转中潮汐效应的地球物理学研究

4.1 日月潮汐与地球引力势

Zhu 等人[61] 探讨了地幔滞弹性引起的地球重力场的长期变化，利用理论上的预期结果比较了弹性海洋潮与测地卫星实测所得的潮汐之间的差异，其中部分差异可用地幔的滞弹性来解释。

高布锡和马际昭[62] 推导出了一组计算引力场参数 C_{21} 和 S_{21} 简单而严格的公式，并根据引力场的其他参数与它们的关系计算了大气质量分布变化、参考极改变和自转形变 (产生固体极潮) 引起的地球引力场参数的变化。

地球在日月引潮力的作用下产生形变，进而引起地球引力势二阶系数的周期变化。夏一飞等人[63,64] 对这些变化和地球的弹性形变能，以 PREM 地球模型为基础从理论上作了计算。

基于高精度的固体潮展开，张捍卫等人[65] 研究了固体潮对地球重力场时变特性的影响，给出了适合应用于潮波法的理论公式，这一公式可为高精度地球重力场时变特性的研究提供理论依据。

4.2　地球 Love 数或带谐形变系数 k/C 的计算和研究

在这一方面，朱耀仲[66] 讨论了地幔滞弹性对有效 Love 数 k 的作用和滞弹地球对平衡海洋潮的响应而引起的间接扰动，分析了它们对带谐潮尺度因子 k/C 的影响。选取迄今为止最完善的地球模型 PREM ，利用它所定义的地球内部基本间断面及所给物质密度和弹性等参数分布，通过求解弹性地幔运动方程，我们得到了形变位移矢量，由此计算出 2 阶 Love 数，理论计算得到的 Love 数与由观测分析所得值符合良好[67] 。与此同时，彭龙辉等人[68] 通过对地核中的方程作一变换，解决了侧向非均匀潮汐数值模拟过程中遇到的难题，由此计算了地核 4 阶系统的 2 阶 Love 数以及 1 至 6 阶的负荷 Love 数。

朱耀仲[69] 考虑海洋对气压变化响应的不同情况，分析了大气带谐潮，求得了地球的带谐形变系数 k/C (此值与地球自转变化速率成正比) 。另外，他也分析了地幔滞弹性对 k 的直接影响和滞弹地球对平衡海潮的响应所产生的间接扰动对 k/C 的影响，求出了它的理论表达式，并用以计算了世界时潮汐变化序列[66] 。谢伯全和郑大卫[70] 探讨了大气活动对 k/C 的影响，以全球气象资料归算的大气角动量序列分析了大气对 ERP 的高频激发作用，发现大气对 LOD 分量高频潮的估计值存在影响，但是对 k/C 随时间和频率的变化不起作用。

更多的工作是从分析天文观测资料 (首先是天文测时资料) 来求解 Love 数。利用中国综合时号改正数系统的 8 架仪器于 1966~1980 年期间的测时资料，朱耀仲[33] 分析了月球带谐潮效应，对 M_m 和 M_f 波求得了 k/C 的加权平均值。用 4 个月的 VLBI 测时资料，在消除大气角动量成分和滤除 35 d 以上的周期项后， Luo 等人[71] 求得 M_m 、 M_f 和 9.12 d 分潮波的 k/C ，它与其他用更长时间段资料所得的结果符合良好。丁月蓉等人[34] 用 BIH 刊布的 20 yr LOD 序列以及自回归分析法检测了潮汐短周期项，并对 M_m 波和 M_f 波计算了 k/C ，但这一结果与纯弹性地球的理论值略有差异。用 IERS 发布的 14 yr 的世界时资料，钱昌夏等人[35] 得到了潮汐短周期项 M_m 和 M_f 的谱峰，解算了 Love 数 k 的值。用 BIH 和 IERS 共 33 yr 的世界时序列，以两种不同的方法，成灼和萧耐园[72] 求得相应于 M_m 波和 M_f 波的 Love 数 k 值。

同样，我国学者在直接用 SLR 观测资料而不用传统测时资料求解洛夫数方面也取得了成果。用卫星测地资料，考虑上下地幔的不同性质和它们的滞弹性， Zhu 等人[61] 求出了对弹性 Love 数 k 、h 、l 和弹性负荷 Love 数 k' 、h' 、l' 的修正值。彭碧波等人[73] 用约 11 yr 的 SLR 测距资料直接解算了 4 个周日波 Q_1 、O_1 、P_1 、K_1 和 4 个半日波 S_2 、K_2 、N_2 、M_2 的弹性和滞弹性地球状态下的 Love 数 h 和 l 值，其结果与由分析 VLBI 测量资料所得的结果相符，也与 IERS 及 Wahr 模型值的潮汐响应趋势相符。吴斌等人[74] 分析了 SLR 测量中卫星轨道的潮汐摄动，求出了 M_m 和 M_f 的 Love 数 k 值，其结果可为固体潮理论模型和地幔滞弹

性提供约束。他们进一步的工作是求出了除 M_m 和 M_f 波外， 18.6 yr 以及 K_1 、O_1 和 M_2 、S_2 潮波的 Love 数 k 和 h 值，其结果与其他空间测地结果和理论模型相当一致 [75] 。

5 方法的改进和优化测量结果的探讨

5.1 计算方法的改进

正如前面所述，在探讨地球自转中的潮汐效应时会涉及大量的天文观测数据的处理和分析。数据处理方法的适当与否直接影响分析的效能和结果的精度。我国学者在这一方面也作了不少的研究工作。

在探讨 Whittaker-Vondrak (W-V) 平滑法的滤波本质基础上，黄昆仪和周雄 [76] 求出了调整参数 ε 、周期 P 和频率响应 A 之间关系的理论表达式，完善了 W-V 平滑法。一种基于 W-V 平滑法的多级滤波器被设计出来，以实现时间序列的窄带滤波 [77] 。通过对事先设计的试验模型序列的试算，郑大卫和董大南 [78] 总结了自回归谱估计的 Marple 算法和 Burg 算法的原理和特点，探讨了 Marple 算法应用于分析天文资料的可行性。高布锡 [79] 提出了一种新的傅里叶变换反卷积方法。这种方法利用反卷积运算消去了窗函数截断资料产生的影响，从而求得真实的傅里叶变换，在频域有极高的分辨率。李正心和钱昌夏 [80] 提出了一种利用 2 阶差分对等间隔时间序列作滤波的新方法，该方法包括差分滤波器、保真差分滤波器和多级保真滤波器等，可十分有效地用于地极运动各分量的分离。郑大卫和周永宏 [81] 揭示和讨论了小波变换的时频谱中随频率而变化的端部效应现象，提出和叙述了跳步时间序列分析的模型和方法，用以限制小波变换的端部效应，改进信号检测的分辨率。

5.2 各种技术的测量条件和数据处理的优化

在计算测站的海潮负荷位移时，杨志根和董大南 [82] 发现对近海区采用褶积积分法，对远海区采用球函数法，可更为有效地提高计算精度和计算速度。在用 LLR 资料归算 ERP 时，金文敬和王强国 [83] 讨论了不同的参数采用值对 ERP 结果的影响，并得出了一些结论。张云飞和川口则幸 [84] 讨论了在 VLBI 联测中延迟和延迟率的测定与基线分析，以及分析中遇到的数据权分配、延迟模糊度的识别和消除、数据剔除准则等问题。在 SLR 资料处理中，冯初刚等人 [85] 设计出一种多级复弧法，即在不同弧段长度内联合解算 ERP 、卫星轨道和测站地心坐标的方法，以减少 ERP 的误差和力学模型的不确定性对测定站坐标的影响。 Wu 等人 [75] 讨论了用 SLR 测距资料计算与不同频率潮波相应的 Love 数的方法，并成功地解算出 Love 数。Huang 和 Jin [86] 对用 SLR 测定 ERP 提出了一种称为适应性脊回归 (ARR) 的新方法，它改进了在脊回归中选取初始常数的这一过程，很有效地减少了多重共线。

6 潮汐效应与脉冲星周期和周期变率的测量

我国学者发现并研究了固体潮对脉冲星周期和周期变率测量产生的影响。固体潮引起的地球形变使得位于地壳上的观测台站在一个潮汐周期内相对于一个平衡位置发生振荡。其振荡速度对所接收到的脉冲产生的 Doppler 效应，会影响测量到的周期 P 和周期变率 P' 的数值 。

把一个测站因固体潮产生的位移对时间求 1 阶和 2 阶导数，可得到测站位移的速度和加速度，若再分别投影到视线方向，即可求得脉冲星的周期改变量 ΔP 和周期变率改变量 $\Delta P'$ 。

具体的计算结果表明，对不同纬度的天文台和不同位置的脉冲星 1 d 中由固体潮引起的 $\Delta P/P$ 可达到 5×10^{-14}~10^{-13} s/s ， $\Delta P'/P$ 可达到 5×10^{-18}~10^{-17} /s 。对于不少脉冲星，这种由固体潮引起的周期和周期变率的改变已影响和超过测量的精度范围。

本研究为一个天文台在利用一系列已知时刻的观测资料对一颗脉冲星进行 P 和 P' 计算过程中，提供了如何改正固体潮影响的计算方法，同时也为天文台如何进行分时观测最有利于消除台站固体潮影响作了选择。另一方面，如果把固体潮模型中的参数值作不同选择，并将理论模型与脉冲星观测资料进行比较，可为检测固体潮提供一种新途径 [87,88] 。

7　结　　论

20 世纪 70 年代末我国就开始了潮汐在天文地球动力学中各种影响的研究。我国学者在这一领域的几乎各个方面都开展了相关的研究并取得了许多成果。我国天文学界与地球物理学界之间存在着紧密的协作。从事这一领域的主要研究机构有：中国科学院上海天文台、中国科学院测量与地球物理研究所和南京大学天文系等。此外，原中国科学院陕西天文台和北京天文台在某些方面也作出了显著贡献。

综上所述，较突出的成果可以归纳为：

(1) 应用直接的数值积分方法，对一个自转的、微椭的、自吸引的以及具有固态内核和液态外核、弹性地幔、海洋和大气的地球计算了完整的章动序列，这个序列包含 343 个周期项，包括黄经项和交角项的同向项和异向项。这个章动序列已被国际天文学联合会 (IAU) 采纳为 4 个 IAU 2000 章动序列之一。

(2) 1985 年国际上提出在天文测量中加上极潮改正的同时，我国学者也独立地提出了同一课题。

(3) 利用我国古代丰富的日月食、月掩星、月犯星等记录计算地球自转的长期减慢，取得了丰硕成果。

(4) 首次研究了固体潮在脉冲星周期测量中的效应。

致谢　中国科学院测量与地球物理研究所钟敏和高布锡研究员、中国科学院国家授时中心刘次沅研究员以及中国人民解放军信息工程大学张捍卫副教授为本文的撰写提供了重要资料，在此谨向他们致以诚挚的感谢。

参考文献：

[1] Munk W H, MacDonald G J F. 地球自转. 李启斌，李致森，张焕志等译. 北京：科学出版社， 1976: 30
[2] Wahr J M. J. Geophys., 1985, 90: 9363
[3] 萧耐园，时玮，尹斌. 陕西天文台台刊， 1985, 8(1): 43
[4] McCarthy D D. IERS Conventions (2000), 2000
[5] Melchior P. 行星地球的固体潮. 杜品仁，吴庆鹏，陈益惠等译. 北京：科学出版社， 1984: 329

[6] Doodson A. T. Proc. R. Soc. A., 1921, 100: 305
[7] Farrell W E. Rev. Geophys. Space Phys., 1972, 10: 761
[8] Schwidersky E. Marine Geodesy, 1983, 6: 219
[9] Eanes R J, Bettadpur S. The CSR 3.0 Global Ocean Tide Model, Technical Memorandum CSR-TM-95-06, Austin, TX: Center for Space Research, University of Texas, 1995
[10] Ray R. A Global Ocean Tide Model From TOPEX / POSEIDON Altimetry: GOT99.2, NASA Technical Memorandum, NASA/TM-1999-209478, Greenbelt, MD: NASA, Goddard Space Flight Center, 1999
[11] Rabbel W, Schuh H. J. Geophys., 1986, 59: 164
[12] Wahr J. M. Geophys. J. Roy. Astron. Soc., 1981, 64: 705
[13] 韩大仲. 测量与地球物理集刊, 1986, 7: 103
[14] 朱耀仲. 天文学进展, 1990, 8(2): 141
[15] Xia Y F, Gao J. In: Mueller I I, Koraczek B eds. Developments in Astrometry and Their Impact on Astrophysics and Geodynamics, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1993: 381
[16] 萧耐园, 张捍卫. 天文学报, 1996, 37(4): 345
[17] 李国营. 博士论文, 武汉: 中国科学院测量与地球物理研究所, 1988: 110
[18] 夏一飞, 萧耐园, 成灼. 天文学报, 1997, 38(4): 359
[19] Huang C L, Jin W J, Liao X H. J. Geophys. Intern., 2001, 146(1): 126
[20] 张捍卫, 柴洪洲, 王占统等. 信息工程大学学报, 2002, 3(1): 1
[21] 黄乘利, 廖新浩, 朱耀仲等. 见: 黄珹编. 中国地壳运动全球背景研究, 上海: 上海科技教育出版社, 2002: 609
[22] Huang C L. In: Huang C ed. Study on the Global Background of the Crustal Motion of China Continent, Shanghai: Shanghai Scientific and Educational Press, 2002: 624
[23] 夏一飞. 南京大学学报 (自然科学版), 1983, 4: 671
[24] 萧耐园. 天文学报, 1984, 25(4): 409
[25] 朱耀仲. 中国科学 (B 辑), 1992, 22(12): 1335
[26] 朱耀仲. 天文学报, 1992, 33(4): 420
[27] 高布锡. 中国科学 (B 辑), 1993, 23(5): 553
[28] 柯熙政, 李孝辉, 邓方林. 天文学报, 2001, 42(1): 88
[29] 萧耐园, 夏一飞, 成灼. 天文学报, 1997, 38(4): 369
[30] 萧耐园, 夏一飞, 成灼. 天文学报, 1998, 39(2): 131
[31] 黄惠玉, 罗时芳. 上海天文台年刊, 1983, 5: 8
[32] 萧耐园, 丁月蓉. 南京大学学报 (自然科学版), 1987, 23(2): 291
[33] 朱耀仲. 天文学报, 1984, 25(3): 287
[34] 丁月蓉, 萧耐园, 夏一飞. 天文学报, 1988, 29(2): 113
[35] 钱昌夏, 李正心, 陈幼芬. 上海天文台年刊, 1993, 14: 49
[36] 韩延本, 李致森, Liu B S 等. 天体物理学报, 1984, 4(2): 107
[37] 李致森, 杨希虹. 中国科学 (A 辑), 1985, 2: 163
[38] 刘次沅. 天文学报, 1986, 27(1): 69
[39] 吴守贤, 刘次沅. 天文学进展, 1987, 5(2): 147
[40] 谢丽琳, 赵铭. 天文学报, 1989, 30(3): 315
[41] 吴守贤, 刘次沅. 天文学报, 1993, 34(1): 80
[42] 许华冠, 金文敬. 上海天文台年刊, 1994, 15: 127
[43] 朱元兰, 冯初刚. 上海天文台年刊, 2001, 22: 36
[44] 杨志根. 上海天文台年刊, 1982, 4: 165
[45] 许厚泽, 郭丰美, 陈振邦等. 天文学报, 1985, 26(2): 163
[46] 夏炯煜. 测量与地球物理集刊, 1985, 6: 73
[47] 钱昌夏. 上海天文台年刊, 1988, 9: 177
[48] 唐美贤, 李正心, 李之方等. 上海天文台年刊, 1988, 9: 188

[49] 郭丰美，李劲峰．测量与地球物理集刊， 1988, 9: 29
[50] 金文敬，钱昌夏，杨志根．上海天文台年刊， 1983, 5: 13
[51] 金文敬，杨志根．上海天文台年刊， 1983, 5: 23
[52] 金文敬，钱昌夏．上海天文台年刊， 1983, 5: 31
[53] 夏一飞，萧耐园，丁月蓉．天文学报， 1988, 29(3): 278
[54] 毛爱林，钱志瀚，杨志根．上海天文台年刊， 1992, 13: 49
[55] 朱进，夏一飞．南京大学学报 (自然科学版), 1993, 29(1): 17
[56] 杨志根， Manabe S, Yokoyama K 等．上海天文台年刊， 1997, 18: 24
[57] 杨志根， Manabe S, Yokoyama K 等．天文学报， 1998, 39(4): 362
[58] 周旭华，吴斌，李军．测绘学报， 2001, 30(4): 327
[59] 周旭华，吴斌，朱耀仲等．天文学报， 2001, 42(3): 272
[60] 杨志根．上海天文台年刊， 1992, 13: 40
[61] Zhu Y Z, Shum C K, Cheng M K *et al*. JGR, 1996, 101: 11243
[62] 高布锡，马际昭．天文学报， 1988, 29(2): 119
[63] 夏一飞，萧耐园，成灼．南京大学学报 (自然科学版), 1999, 35(1): 12
[64] 夏一飞，萧耐园．天文学报， 2001, 42(3): 226
[65] 张捍卫，柴洪洲，王占统等．大地测量与地球动力学， 2002, 22(1): 76
[66] 朱耀仲．天文学报， 1994, 35(4): 406
[67] 萧耐园，夏一飞，成灼．测绘学报， 1998, 27(3): 246
[68] 彭龙辉，李国营，许厚泽．测绘学报， 1998, 27(4): 287
[69] 朱耀仲．天文学报， 1986, 27(2): 106
[70] 谢伯全，郑大卫．天文学报， 1996, 37(2): 113
[71] Luo S F, Zheng D W, Robertson D S *et al*. JGR, 1987, 92(B11): 11657
[72] 成灼，萧耐园．南京大学学报 (自然科学版), 1997, 33(2): 223
[73] 彭碧波，吴斌，许厚泽．测绘学报， 2000, 29(4): 305
[74] 吴斌，彭碧波，郝兴华．天文学报， 2000, 41(3): 306
[75] Wu B, Peng B B, Zhu Y Z *et al*. J. Geodetic Soc. Jpn., 2001, 47(1): 174
[76] 黄昆仪，周雄．天文学报， 1981, 22(2): 121
[77] 郑大卫，董大南．天文学报， 1986, 22(4): 368
[78] 郑大卫，董大南．天文学报， 1987, 28(4): 364
[79] 高布锡．天文学报， 1990, 31(2): 228
[80] 李正心，钱昌夏．天文学报， 1992, 33(3): 229
[81] 郑大卫，周永宏．上海天文台年刊， 1996, 17: 18
[82] 杨志根，董大南．上海天文台年刊， 1985, 7: 41
[83] 金文敬，王强国．天文学报， 1986, 27(2): 85
[84] 张云飞，川口则幸．上海天文台年刊， 1988, 9: 138
[85] 冯初刚，朱文耀，张华．上海天文台年刊， 1990, 11: 1
[86] Huang C L, Jin W J. In: Huang C ed. Study on the Global Background of the Crustal Motion of China Continent, Shanghai: Shanghai Scientific and Educational Press, 2002: 616
[87] Rong J X, Xiao N Y, Zhao M. Chin. Astron. Astrophys., 1996, 20(4): 503
[88] Rong J X, Xiao N Y, Zhao M. Science in China (Series A), 1996, 39(11): 1123

Progress in China in the Tide Researches in Astrogeodynamics

XIAO Nai-yuan, XIA Yi-fei

(*Department of Astronomy, Nanjing University, Nanjing 210093, China*)

Abstract: In this paper the tidal phenomena are concisely specified, including the solid tides, ocean tides and atmospheric tides due to the luni-solar tide-generating force, and the Earth pole tide due to the motion of the Earth's rotation axis (polar motion); as well as their effects on the Earth rotation.

The outcomes of scientific researches of Chinese astronomers on this scope are emphatically expounded. These researches deal with the mechanisms of the effects of tides on the Earth rotation, namely relations between the effects of tides and the Earth rotation, involving construction of theoretical models of these relations, analysis of the influence of tides upon the Earth rotation, computation of the secular deceleration of the Earth rotation with abundant astronomical records of ancient China, calculation of Love numbers of an elastic or anelastic Earth, effects of tides and nutation series calculated on the basis of a certain Earth model etc.; the researches deal also with the tidal effects on the results of measurements of the Earth rotation parameters with various techniques and their corrections, as well as with the optimization of observational methods and the improvement of data processing method related to the tides.

Finally, the effects of tides discovered by Chinese researchers on the measurements of the period and period rate of pulsars are briefed, though very small in their magnitude but not negligible.

Key words: astrometry; luni-solar tides; pole tide; review; variation of the Earth rotation; measurement of the Earth rotation