# **基于我国自主观测解算EOP的长期预报及精度评估**

许雪晴1, 3，郭丽1, 2，周伟莉1, 2，张志斌1, 3，宋淑丽1, 3，王广利1, 2, 3，齐朝祥1, 3

（1. 中国科学院上海天文台，上海，200030；2. 上海市空间导航与定位技术重点实验室，上海，200030；

3. 中国科学院大学，北京，100049）

**摘要：**地球的自转运动可以用地球定向参数（EOP）来描述，EOP起到了链接天球和地球参考系的关键作用，是重要的时空信息参数。因观测数据处理的滞后性，EOP的实时应用需要通过预报序列来保障，这在空间飞行器定轨与制导以及深空探测等项目中有现实应用。基于国际地球自转和参考系服务的综合解及我国自主观测的快速解组成EOP联合序列，在拟合模型中引入气候变率开展365 d长期预报。针对近两年时间段，统计预报精度并与美国海军天文台（USNO）维护的预报产品进行对比。结果表明，基于我国自主观测联合序列生成的预报EOP，其短期跨度精度稍逊于USNO产品，但在中长期跨度中则具有精度优势。特别是世界时参数，其中长期预报精度改进约为20%—30%，体现了我国自主EOP观测解算以及预报数据服务的水平。

**关键词：**地球自转变化；地球定向参数；高精度预报；快速世界时解；快速极移解

**中图分类号：**P228 **文献标志码:** A **文章编号：**

1 引 言

地球的自转运动表征了固体地球与大气、海洋、地幔和地核在各种时空尺度上的耦合过程，可以直观地用地球定向参数（Earth Orientation Parameters, EOP）来描述。EOP是天球参考框架（International Celestial Reference Frame, ICRF）和地球参考框架（International Terrestrial Reference Frame, ITRF）之间的转换参数，在深空探测、卫星精密定轨等项目中都有重要应用。地球自转运动极为复杂且时变性高，因此，其监测必须依靠多种空间大地测量技术的综合观测来实现。常规的空间大地测量手段主要有甚长基线干涉测量（Very Long Baseline Interferometry, VLBI）、人卫激光测距（Satellite Laser Ranging, SLR）、全球卫星导航系统（Global Navigation Satellite System，GNSS）和多普勒卫星测轨和无线电定位组合（Doppler Orthography and Radio Positioning Integrated by Satellite, DORIS）等[1-3]。

天球参考框架、地球参考框架以及他们之间的链接参数EOP，构建了空间基准的主要内涵，是一切地基、空基活动的参考基准，也是我国独立自主开展空间项目的关键技术。以下图1描述了EOP的内容及其与天球和地球参考框架的链接关系。如图所示，EOP通常包含三部分：（1）岁差和章动，描述了地球自转轴在空间的运动，是日月与行星引力作用在地球赤道隆起部分的结果；（2）极移，是自转轴相对于地壳的运动；（3）日长变化，反映了地球自转速率的变化。由于岁差章动可以用模型精确计算，日长变化则可以通过世界时转换得到，因此，以下本文所说的EOP均指极移（包含Px、Py分量）和世界时与协调世界时之差（UT1-UTC），有时也用UT1简称。

收稿日期： ； 修回日期：
资助项目：国家重点研发计划（2022YFE0133700），国家自然科学基金(12473069, 12233010)和中国科学院战略性先导科技专项(XDA0350205)
通讯作者：许雪晴，xqxu@shao.ac.cn



**图1 EOP及其与天球和地球参考系的链接关系示意图**

高精度EOP数据通常是基于地球参考框架定义，通过引入一定约束对多种空间大地测量数据进行加权综合确定，即为EOP综合解。由于复杂的数据处理过程，高精度EOP综合解存在4周左右的延迟。近一个月的EOP数据通常采用GNSS的极移解，以及VLBI观测的世界时进行补充，即为EOP快速解。当前，EOP综合解由国际地球自转和参考系服务（International Earth Rotation and Reference Systems Service，IERS）发布；提供EOP快速解的单位则有美国海军天文台（US Naval Observatory， USNO）和欧洲空间局 (European Space Agency，ESA)等，国内则缺乏相关产品[4-8]。当前，全球大多数卫星导航系统以及空间探测任务均高度依赖IERS发布的EOP数据。随着我国各方面能力的提升以及当前面临的新世界格局，亟需建立一套独立自主的EOP观测解算以及预报数据服务系统[9]。

联合EOP综合解和快速解，向后外推可以得到预报数据，高精度EOP预报数据具有非常重要的现实应用需求。近年来，许多学者针对EOP预报展开了研究。在众多预报方法中，最小二乘外推和自回归（Least Square and Auto-Regressive, LS+AR）组成的模型，因其简单且有效，从提出至今被公认为是最可靠的EOP预报模型[10-11]。该联合方法经历了2次EOP预报比较活动（EOP Prediction Comparison Campaign, EOP PCC）的检验[12-13]，也是IERS公报预报数据获取的主要方法[14]。因此，本工作主要采用LS+AR模型来进行EOP的长期预报。与此同时，大量研究表明，由大气、海洋等流体组成的有效角动量（Effective Angular Momentum, EAM）是地球自转变化的主要激发因素，它的赤道和轴向分量分别对应于两个极移分量和自转速率参数的激发。其中，德国地学研究中心（GeoForschungsZentrum, GFZ）每日发布延迟1 d的EAM基础数据集和6日预报序列，这为EOP超高精度的1-10 d预报提供了基础[15-18]。近几年，许多研究将EAM数据与数学模型相结合开展EOP预报，结果均表明引入流体激发可以有效改进短期预报精度[19-23]。

然而，上述工作均采用国际EOP数据，主要针对极移参数30 d以内的短期预报开展研究，针对UT1-UTC参数和EOP中长期预报的讨论较少，且缺乏利用自主观测解算EOP数据的预报分析。与此同时，EAM只能改进EOP超短期预报精度，对中长期预报没有影响。基于该现状，本工作采用自主观测解算的近一月EOP数据，结合IERS综合解组成联合序列，然后采用LS+AR模型进行EOP的365 d长期预报。鉴于EAM无法改进EOP中长期预报的情况，结合气候变化在EOP中的指征研究[24-30]，我们在拟合模型中引入与气候相关的年际变化周期并采用最新解算的地球物理参数，以此来提高EOP中长期预报精度。

2 自主快速EOP精度评估

为保障国家重大项目对自主测定与预报EOP（特别是世界时UT1）的紧迫需求，2022年5月初，上海天文台组建了地球定向参数和世界时快速测量团队，在前期牵头建设好的5个VLBI测站和若干GNSS监测站等设施基础上，采用国内自主观测和国际联测并行方式，启动了快速EOP产品和服务。为了补齐IERS综合解的延迟，近1月EOP实测序列为采用自主观测数据（上海佘山13-m、上海天马13-m、新疆南山13-m VLBI天线，以及上海天文台GNSS中心）叠加国际测站数据解算而来。

为了融合EOP综合解与自主快速解，需要进行一些简单的数据预处理。首先，GNSS快速极移数据时间点为每日UTC 12 h，需要内插到每日UTC 24 h与IERS C04序列一致；其次，VLBI 快速UT1序列时间点则毫无规律，本文采用加密内插方式，输出每日UTC 24 h点值构成快速UT1序列。以2023年第一季度为例，以下图2显示了本文采用的自主观测解算EOP相对于IERS C04综合解的残差序列及其精度统计情况。这里，选用平均绝对误差（Mean Absolute Error，MAE）作为精度指标（MAE具体计算公式见下一节）。



**图2 自主观测解算EOP相对于IERS C04综合解的残差序列及其精度统计图**

由图2可以看出，相较于高精度的事后综合解序列，自主观测解算的EOP残差序列总体上分布较为集中，显示了较好的精度稳定性。为了进行对比，本文针对同一时间段，统计了USNO解算的快速EOP序列精度。其中，极移两个分量的MAE分别为0.033 mas和0.028 mas，UT1-UTC参数的MAE为0.019 ms。可以看出，相较于USNO的快速EOP解，自主快速EOP解的精度还存在一定差距。

这些差距可以简单总结为以下几个方面：首先，三个残差序列均显示了半月变化项的存在，这可能与自主解算没有在潮汐模型中考虑更小的变化项有关[3, 5, 9]；其次，极移残差序列还表现出一定的线性偏差，这主要与自主快速数据处理过程比较简单，没有与整体框架进行综合连接有关；最后，世界时残差序列存在局部观测点较为分散的情况，这可能与参与观测的测站基线长度有限相关。鉴于此，未来自主EOP快速解精度的提高可以从两个方面开展：一是增加全球布局的测站，降低因基线长度不足而导致的解算误差；二是改进快速EOP综合处理方案，消除系统偏差以及降低潮汐模型误差影响。

3 引入气候变率改进EOP中长期预报

本工作根据IERS提供的1962年1月1日至今的综合解（EOP C04序列），与自主观测解算的快速解组成EOP联合观测序列。基于该EOP联合观测序列，采用LS+AR方法进行预报。其中，EOP序列中的规则项（主要包括趋势项和周期项）采用模型拟合外推方式预报，剩余残差项则由自回归模型预报，两者结合即可获得EOP 1-365 d预报序列。拟合模型和自回归模型分别表示如下

 $EOP\_{regular}\left(t\right)=a+bt+c\_{k}\sum\_{k=1}^{m}\sin(\left(\frac{2π}{T\_{k}}t+∅\_{k}\right)),$ （1）

 $EOP\_{residual}(t)=\sum\_{l=1}^{p}α\_{l}EOP\_{residual}(t-l)$. （2）

式中，$EOP\_{regular}$ 和$ EOP\_{residual}$ 分别代表规则项和残差项，$a, b, c\_{k},T\_{k},∅\_{k} $为拟合模型参数，$p,α\_{l}$ 则为自回归模型参数[29]。

已有研究表明，地球流体角动量（EAM）对改进EOP超短期预报效果显著，却对中长期预报几乎无影响[20-24]。因此，本工作没有引入EAM来进行EOP长期预报。此外，近期多篇论著针对地球自转变化中的气候变化表征展开研究，证实近年来EOP序列发生了趋势改变[24, 26]。以下图3显示了1962年至今的EOP观测序列，红色方框标记出各参数发生异常的时间段。

**图3 1962-2024年EOP观测序列图**

图3中，子图（a）和（b）展示了Px和Py观测序列，可以发现，2012-2021年期间地球极移序列的振幅急剧减小。最新研究结果表明极移振幅衰减是由大气、海洋的反相位激发导致，这背后反映的是海气耦合模式的改变[26]。子图（c）为UT1-UTC序列，断点表示由于地球自转长期减慢而产生的跳秒。可以看到，UT1-UTC序列的减小趋势在2020年发生改变，逆转为增加趋势。这种趋势逆转表明地球近期进入自转加速状态，且2020-2023年期间发生的三重拉尼娜事件对此次自转加速存在约9%的贡献[29]。EOP序列的这些趋势变化势必会影响其中长期预报，需要予以考虑。

基于上述气候变化在EOP序列中的指征研究，本工作在EOP预报模型中引入气候变率，来改进中长期预报精度。具体改进方法如下：一是针对世界时序列的复杂变化，在拟合模型中除了考虑常规的周年、半年、三分之一年周期项外，还引入若干年际变化周期（约2、3、6、7年周期项），以此来增强序列长期变化项的拟合准确性[27-29]；其次是针对极移序列近期的振幅调整，引入流体激发数据来重新估计钱德勒摆动周期（约为432.4 d，具体解算方法详见文献[31]）。这些数据的引入和更新均考虑了近年来气候变化对地球自转变化的影响，本文统称为气候变率。

基于上述改进措施，针对EOP联合观测序列可以获得1-365 d EOP预报数据，本数据文件每月生成一次，并上传至数据平台供相关用户下载使用。该预报数据文件自2022年5月至今已累积两年，可以进行精度评估。本文选取2022年5月至2024年7月间的预报数据，与对应时期的EOP观测数据进行对比，统计MAE作为精度指标。MAE公式为

 $MAE={\sum\_{i=1}^{n}\left|O\_{i}^{j} -P\_{i}^{j}\right|}/{n.}$ （3）

式中，$O$为EOP观测值，$P$为预报值，$j$为预报跨度，$n$为参与预报精度统计的点数。

4 EOP中长期预报结果与分析

为了更好地评估本工作的长期EOP预报序列精度，选取同一时期IRES公布的Bulletin A预报数据进行对比。以下图4显示了2022年5月至2024年7月间，本工作生成的以及Bulletin A公布的1-365 d EOP预报精度对比情况。其中，Bulletin A文件由美国海军天文台提供，其结果以下标记为USNO，本文结果则标记为上海天文台（Shanghai Astronomical Observatory, SHAO）。



**图4 SHAO及USNO 365** d **EOP预报精度对比图**

从图4可以看出，在EOP不同参数、不同跨度预报精度上，两家表现各有不同。首先，对于Px参数，大致上可以认为SHAO在50-150 d以内和320 d之后的预报精度占优，而USNO在50 d 以内和150-320 d之间的预报精度更高；其次，对于Py参数，SHAO则在180-260 d之间的预报精度占优，其余跨度USNO的预报精度更高；最后，对于UT1-UTC参数，1-140 d之间USNO领先，而在140 d之后则SHAO具有明显优势。按照应用需求不同，通常可以将EOP预报分为以下几种跨度：（1）超短期预报（10 d以内）；（2）短期预报（90 d以内）；（3）中期预报（180 d以内）；（4）长期预报（365 d以内）。为了直观对照，以下图5显示了两家在上述主要跨度上的MAE比较结果。此外，图5还增加显示了三个参数在30 d和60 d的短期预报精度情况。



**图5 SHAO及USNO 主要跨度EOP预报精度对比图**

依据图5定点跨度的MAE对比情况，可以总结如下：（1）在10 d跨度上，USNO的EOP预报精度相较SHAO稍高；（2）对于30 d、60 d、90 d短期预报精度，SHAO和USNO分别在Px和Py分量上各有优势，USNO在UT1-UTC分量上占优；（3）对于180 d中期预报精度，SHAO在Px和UT1-UTC分量上均有优势，USNO则在Py分量上稍微领先；（4）对于365 d长期预报精度，SHAO在Py和UT1-UTC分量上大幅领先，USNO则在Px分量上稍有优势。

总体来说，在超短以及短期预报上USNO小幅领先，这主要与其近1月的快速EOP解精度比较高有关；在中长期预报中SHAO则具有精度优势，表明近一月的快速解精度仅能影响90 d以内短期预报，中长期预报精度则更多地依赖预报模型。SHAO在中期预报中的优势同时表明，在预报模型中引入气候变率可以提高精度。特别是世界时参数，其中长期预报精度改进约为20%—30%。此外，需要说明的是，本文结果显示引入气候率对极移的改进效果不如UT1-UTC显著。这主要是因为在本文选取的评估时间段（2022-2024年），极移的振幅衰减调整已经完成并恢复到常规振幅阶段，因此，钱德勒周期的更新对该阶段的预报影响不大；在此期间，UT1-UTC的复杂变化趋势仍在持续，因此，引入相关年际周期可以有效改善其中长期预报。

5 总结与展

本工作针对自主观测解算的快速EOP解，进行数据预处理后与EOP C04综合解组成联合观测序列。基于该联合序列，首次在模型中引入气候变率向后外推获得1-365 d实时EOP预报数据，然后以文件形式上传至数据平台服务相关用户。对本工作SHAO以及国际上USNO生成的EOP预报数据进行精度评估，对比结果表明，SHAO与USNO在不同跨度预报上各有优势。综合来说，SHAO与USNO在快速EOP解以及1-365 d EOP预报上的精度水平相当。上述结果表明，经过多年的技术积累，我国已经具备EOP的多技术建设、观测解算、数据处理以及产品服务等能力。

为了更好地保障我国重大项目应用以及满足科学研究需求，自主EOP数据服务还有很大的提升空间。具体可以从以下几个方面开展工作：（1）采用多技术并置策略消除测站坐标误差等的影响，增强VLBI、GNSS等测站的稳定性；（2）结合高分辨率数据精确分析EOP各频段激发机制，降低固体潮以及海潮模型误差的影响；（3）制定新的快速EOP数据处理策略，消除框架不一致带来的系统偏差；（4）改进现有地球自转理论，引入全要素地球物理激发因素进一步提高EOP预报精度；（5）广泛调研用户需求，提供个性化EOP数据服务。

参考文献

1. Lambeck K. Cambridge: Cambridge University Press, 1980
2. Bizouard C, Gambis D. International Association of Geodesy Symposia, 2009, 134: 265
3. Petit G, Luzum B. Bureau International Des Poids Et Mesures Sevres (France), 2010
4. 项宇, 蒋孝卿, 杨建华, 等. 天文学进展, 2023, 42(2): 269
5. 黄逸丹, 舒逢春, 何旋, 等. 武汉大学学报·信息科学版, 2023, 48(1): 75
6. 范昊鹏, 孙中苗. 测绘科学技术学报, 2018, 35(2): 141
7. Schartner M, [Plotz C](http://www.zhizhen.com/s?sw=author%28+Pl%C3%B6tz+Christian%3Csup+class%3D%22sup%22%3E%C2%A02%C2%A0%3C%2Fsup%3E%29), [Soja B](http://www.zhizhen.com/s?sw=author%28+Soja+Benedikt%3Csup+class%3D%22sup%22%3E%C2%A01%C2%A0%3C%2Fsup%3E%C2%A0%0A%C2%A0%29). Journal of Geodesy, 2022, 96 (4): 1
8. Kern L, Schartner M, Bohm J, et al. IVS 2022 general Meeting Proceedings, 167
9. 徐天河, 王潜心, 于素梅, 等. 导航定位学报, 2015, 3(03): 13
10. Xu X, Zhou Y. Adv Space Res, 2015, 56(10): 2248
11. 许雪晴, 周永宏.飞行器测控学报, 2010, 29(2): 70
12. Kalarus M, Schuh H, Kossek W, et al. Journal of Geodesy, 2010, 84(10): 587
13. Sliwinska J, Kur T, Winska M, et al. Artificial Satellites, 2022, 57(s1): 237
14. Kiani M, Schartner M, Soja B. J Geophys Res: Solid Earth, 2022, 127, e2022JB024775
15. Dobslaw H, Dill R. Adv Space Res, 2018, 61(4): 1047
16. Dill R, Dobslaw H, Thomas M. Journal of Geodesy, 2019, 93(3): 287
17. Dill R, Saynisch J, Irrgang C, et al. Earth and Space Science, 2021, 8(12): 1
18. Dill R, Dobslaw H, Thomas M. Artificial Satellites, 2023, 58(4): 330
19. Wu Y, Zhao X, Yang X. Artificial Satellites, 2022, 57(s1): 290
20. Kong Q, Han J, Wu Y, et al. Geophys J Int, 2023, 235(2): 1658
21. Luo J, Chen W, Ray J. Surv Geophys, 2022, 43: 1929
22. Kehm A, Hellmers H, Blobfeld M, et al. Journal of Geodesy, 2023, 97(1): 1
23. 魏娜, 周雨欣, 许雪晴, 等. 地球物理学报, 2024, 67(4):1356
24. Duncan A. Nature, 2024, 628: 333
25. Mostaf S, Surendra A, Mathieu D, et al. Nature Geoscience, 2024, 17: 705
26. Xu X, Fang M, Zhou Y, et al. Journal of Geodesy, 2024, 98: 59.
27. Xu X, Zhou Y, Xu C. Atmosphere, 2023, 14, 982.
28. Xu X, Zhou Y, Duan P, et al. Journal of Geodesy, 2022, 96.
29. 许雪晴, 周永宏, 胥灿灿. 地球与行星物理论评(中英文), 2023, 54(5): 541
30. Xu X, Zhou Y, Xu C. Journal of Planetary Geodesy, 2023, 57: 262
31. 胥灿灿, 方明, 许雪晴, 等. 天文学进展, 2021, 39(4):544

# **The long-term forecast and accuracy evaluation of EOP based on our autonomous observations**

XU Xue-qing 1, 3, GUO Li 1, 2, ZHOU Wei-li 1, 2, ZHANG Zhi-bin 1, 3, SONG Su-li 1, 2, 3, WANG Guang-li 1, 2, 3, QI Zhao-xiang 1, 3

*(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Science, Shanghai 200030; 2. Shanghai Key Laboratory of Space Navigation and Positioning Techniques, Shanghai 200030; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)*

**Abstract**：Earth's rotation can be intuitively described using Earth Orientation Parameters (EOP), which are important spatiotemporal information indicators and play a crucial role in linking the celestial and the terrestrial reference frame. Due to the latency in processing observational data, real-time applications of EOP necessitate forecast sequences, which are vital for spacecraft orbit determination and navigation, as well as deep space exploration projects. This study is based on the hybrid EOP sequence using the International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS) solution and China’s autonomously observed rapid solutions, incorporating climatic variability to perform a 365-day long-term forecast. For the period from 2022 to 2024, the accuracy of EOP forecasts was statistically analyzed and compared with forecast products maintained by the United States Naval Observatory (USNO). The results indicate that while the short-term forecast accuracy of EOP based on the hybrid observations slightly falls short of USNO products, it demonstrates a significant advantage in medium to long-term forecasts. Especially for the parameters of universal time, the improvement of medium- to long-term forecast is about 20% -30%, this reflects the level of China's independent EOP observation solutions and forecast data services.

**Key words：**Earth rotation change; Earth Orientation Parameters; High accuracy prediction; Rapid UT1; Rapid polar motion