



武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目： 基于中国 CRA-40 再分析数据计算大气去混频模型及其质量评估
作者： 熊大伟，游为，余彪，刘充，范东明
DOI： 10.13203/j.whugis20220790
收稿日期： 2023-10-06
网络首发日期： 2023-12-08
引用格式： 熊大伟，游为，余彪，刘充，范东明. 基于中国 CRA-40 再分析数据计算大气去混频模型及其质量评估[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版).
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20220790>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

Doi: 10.13203/j.whugis20220790

引用格式:

熊大伟, 游为, 余彪, 等. 基于中国 CRA-40 再分析数据计算大气去混频模型及其质量评估[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, Doi:10.13203/j.whugis20220790. (XIONG Dawei, YOU Wei, YU Biao, et al. Computation and Assessment concerning Atmospheric Dealiasing Models Using CRA-40 Reanalysis Dataset[J] *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, Doi:10.13203/j.whugis20220790.)

基于中国 CRA-40 再分析数据计算大气去混频模型 及其质量评估

熊大伟¹, 游为¹, 余彪¹, 刘充¹, 范东明¹

1 西南交通大学地球科学与环境工程学院, 四川, 成都, 611756

摘要: 大气与海洋非潮汐高频质量变化是时变重力场反演过程中需要精确建模并提前扣除的重要误差来源, 随着我国重力卫星计划的推进, 实现这一地球重力场背景力模型的国产化具有重要意义。CRA-40 为中国第一代大气再分析产品, 对其表面压力与温度数据的比较结果表明其数据质量与第三代全球再分析产品相当。以 CRA-40 为输入数据计算了一套大气去混频模型 CRA-40-AD, 从球谐系数、KBRR 残差、反演时变重力场三个层面对其做质量评估。评估结果表明, CRA-40-AD 与 GFZ AOD1B RL06 (RL06) 在谱域以及时域相关性较好, 与 RL06 的谱域差距在约 20 阶之后小于 GRACE 模拟精度; CRA-40-AD 与 RL06 的星间距离变率残差 RMS 差异不足 20 nm/s, 满足当前 GRACE K 波段测距系统的精度; CRA-40-AD 与 RL06 反演时变重力场的大地水准面高阶方差曲线的数值差异在 0~0.6 mm 之间, 满足地球重力场 1 mm 的大地水准面精度要求。对 CRA-40 大气再分析计算大气去混频模型的多方验证表明 CRA-40-AD 模型满足当前时变重力场反演的要求, 有望实现大气去混频产品的完全国产化。

关键词: 大气去混频模型, CRA-40, 再分析数据集, 重力场模型, GRACE

Computation and Assessment Concerning Atmospheric Dealiasing Models Using CRA-40 Reanalysis Dataset

XIONG Dawei¹ YOU Wei¹ YU Biao¹ LIU Chong¹ FAN Dongming¹

1 Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University,
Chengdu 611756, China

Abstract: Objectives: Atmospheric and oceanic non-tidal high-frequency mass variations constitute a primary source of error that need to be accurately modeled and removed before the process of time-variable gravity field inversion. The advancement

收稿日期: 2023-10-06

项目资助: 国家自然科学基金 (41974013, 42174014)。

第一作者: 熊大伟, 硕士, 主要从事大气去混频模型的研究。xxx_dw@my.swjtu.edu.cn。

通讯作者: 游为, 博士, 副教授, 主要从事卫星重力测量及测量数据处理研究。youwei@swjtu.edu.cn。

of China's gravity satellite mission makes achieving the domestic production of the background force model for the earth's gravity field highly meaningful. **Methods:** CRA-40 is China's first generation of reanalysis products. The evaluation of surface pressure and temperature illustrates that its quality is comparable to the third generation of global reanalysis on the basis of the comparisons we perform. A set of atmospheric dealiasing models, CRA-40-AD, are calculated by using CRA-40 as input data. To investigate the applicability of employing CRA-40 reanalysis to calculate atmospheric dealiasing model, the validation of resulted models was carried out from three aspects including spherical harmonic coefficients, KBRR residuals and geoid heights derived from time-variable gravity field models. **Results:** The results of the evaluations indicate that CRA40-AD exhibit a strong correlation with GFZ AOD1B RL06 (RL06) in both spectral and time domains. The differences between CRA40-AD and RL06 in spectral domain are smaller than the GRACE simulation accuracy after 20 orders. The RMS differences of the KBRR residuals between CRA-40-AD and RL06 are below 20 nm/s, which conforms to the accuracy of GRACE K-band ranging system. The differences in geoid degree between CRA-40-AD and RL06 range from 0 to 0.6 mm, which satisfies the 1 mm geoid accuracy. **Conclusions:** Consequently, CRA-40 has been shown to have the potential to be used in atmospheric dealiasing models, making the fully localization of atmospheric dealiasing products promising to achieve.

key words Atmospheric dealiasing model; CRA-40; reanalysis datasets; gravity fields; GRACE

相比传统的重力测量方法（如地面和航空重力测量），卫星重力测量不受天气状况和地理环境等条件的限制，具有全球高覆盖率、高精度和高时空分辨率等优点^[1]。自 GRACE（Gravity Recovery And Climate Experiment）及其下一代 GRACE-FO（GRACE Follow-On）重力卫星发射以来，其解算时变地球重力场精度不及模拟精度^[2]，文献[3]指出引起时变地球重力场误差的主要来源是加速度计噪声、海潮背景场误差以及大气和海洋的高频非潮汐质量变化，并表明高频质量变化的混频效应对时变重力场精度影响最大^[4-6]。因此反演高精度时变地球重力场必须对大气与海洋高频质量变化精确建模并提前扣除，以减少混频效应对重力场精度的影响或是对水文信号解译的影响^[7-9]。大气高频质量变化的建模依托于温度、气压、比湿、表面重力势的实时或再分析数据。大气再分析数据采用固定的物理模型、数值模型、数据同化模型以及预报模型^[10,11]，避免再分析数据的时空分辨率及垂直分辨率受上述模型更新而发生变化，有利于大气去混频模型长时间序列的稳定性^[12,13]，文献[14]推荐使用大气再分析数据计算大气去混频模型。

再分析模式通过将不规则格网的实测数据同化进数值天气预报模型，并在资料同化系统中完成实测数据和预报模型的最优集成以重现全球天气状况，提供空间分布均一、时间连续、层级分明的全球气象信息^[11,15]。从 20 世纪 90 年代中期开始，世界各气象组织已先后计划并实施了一系列全球大气资料再分析计划，第一代全球再分析主要有美国国家环境预测中心（National Centers for Environmental Prediction, NCEP）和大气研究中心（NCAR）联合研制的 NCEP/NCAR^[16]、欧洲中期数值预报中心（European Centre for Medium-Range Weather Forecast, ECMWF）的大气再分析 ERA-15（ECMWF Reanalysis - 15 years）^[17]、美国

国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 资料同化局 (Data Assimilation Office, DAO) 的全球大气再分析资料 NASA/DAO^[18]; 第二代全球再分析主要包括美国国家环境预测中心和美国能源部 (United States Department of Energy, DOE) 联合研制的 NCEP/DOE^[19]、欧洲中期数值预报中心的 ERA-40^[20]、日本气象厅 (Japan Meteorological Agency, JMA) 主持研制的 25 年再分析计划 JRA-25 (Japanese 25 year atmospheric reanalysis)^[21]; 第三代全球再分析主要包括 NCEP 的 CFSR (the Climate Forecast System reanalysis)^[22]、ECMWF 的 ERA-Interim (ECMWF Reanalysis Interim)^[10]、JMA 的 55 年再分析计划 JRA55 (Japanese 55 year atmospheric reanalysis)^[23]; ECMWF 的 ERA5 (ECMWF reanalysis version 5)^[24]为最新一代全球再分析产品。再分析资料为更深入地理解气候变化的机制提供了巨大的帮助, 在全球及区域水循环、风力资源利用和发展方面提供了重要的信息来源^[25-28], 已成为气象研究中不可或缺的数据源^[29]。是否拥有自主研发的再分析数据集已成为一个国家气象综合实力的体现, 中国气象局 (China Meteorological Administration, CMA) 于 2013 年 11 月启动了全球再分析计划。国家气象信息中心 (National Meteorological Information Center, NMIC) 已制成并发布了 10 年再分析试制产品 CRA-Interim (10-yr global reanalysis interim dataset) (2007—2016 年) 以及我国第一代全球大气再分析产品 (40 year global reanalysis dataset released by China Meteorological Administration, CRA-40) (1979—2018 年)^[30-32], 该业务系统也同步上线近实时的 CRA-40 数据集。

国际上除了 GRACE 三大官方机构德国地学中心 (Deutsches Geo Forschungszentrum, GFZ)、美国航天研究中心 (Center for Space Research, CSR)、喷气实验室 (Jet Propulsion Laboratory, JPL) 之外, 欧洲航空局 (European Space Agency, ESA)^[33]以及波恩大学大地测量与地理信息研究所 (Institute of Geodesy and Geoinformation, Bonn University, ITG)^[14]也发布了自主计算的去混频产品, 国内发布去混频模型的机构主要有华中科技大学的杨帆^[34]以及西南交通大学的游为^[35]等。本文通过比较 CRA-40 与国际主流大气再分析产品的表面压力、垂直层温度后认为 CRA-40 有望应用于去混频模型计算, 并以此为输入数据计算了一套大气去混频模型 CRA-40-AD, 与多种大气去混频模型开展一系列质量评估, 研究我国自有大气再分析数据能否作为我国重力卫星背景场建模的输入数据。

1 数据

1.1 实验数据

1.1.1 再分析数据

本文选用 CRA-40 中的表面压力、表面重力势能以及等压层的温度和比湿数据来计算大气去混频模型, 其它参与比较及计算的数据有: CFSR、ERA-Interim、ERA5、JRA55 和 NCEP FNL (NCEP Final Analysis, FNL), 其中, FNL 基于全球预报系统 (Global Forecast System, GFS) 以及全球数据同化系统 (Global Data Assimilation System, GDAS) 制作, 在本文中也用于计算大气去混频模型。表 1 中 IFS 为综合预报系统 (Integrated forecast system), NWP 为数值天气预报系统 (Numerical weather prediction), CRA-40 预报模型基于 NCEP GFS 开展本土移植与优化^[36], 在格网点统计插值三维变分同化系统 (Grid-point Statistical

Interpolation three dimensional variation, GSI 3D-Var) 中实现观测资料的循环同化^[37, 38]。

表 1 再分析数据主要质量特征

Tab.1 Main Characteristics of Reanalysis Datasets Employed in Evaluation.

类别	CRA-40	ERA5	EAR-I	CFSR	JRA55	FNL
发布机构	CMA	ECMWF	ECMWF	NCEP	JMA	NCEP
时间分辨率	6 小时	1 小时	6 小时	6 小时	6 小时	6 小时
空间分辨率	0.5°	0.25°	0.5°	0.5°	2.5°	1°
垂直分辨率	47 层	137 层	60 层	37 层	37 层	40 层
预报模型	GFS 改进 ^[38]	IFS	IFS	GFS	NWP	GFS
同化方法	3D-Var	Ensemble of 4DVAR	4D-Var	3D-Var GSI	4D-Var	GDAS

1.1.2 大气去混频模型

在对 CRA-40-AD 质量评估中,除了使用与本文相同算法、基于 ERA-Interim 再分析数据^[39]计算的 SWJTU1 模型^[35]和基于 FNL 数据计算的 FNL Atmospheric Dealiasing (FNL-AD) 模型外,也应用了其他机构发布的大气去混频模型,包括官方模型 GFZ AOD1B RL05 (RL05)^[40]、GFZ AOD1B RL06 (RL06)^[41]以及文献^[34]计算的 HUST-ERA5 模型。

其中, CRA-40、ERA-I 与 FNL 大气数据计算大气模型的时间分辨率为 6 小时,球谐截断到 180 阶次; RL06 时间分辨率为 3 小时,球谐截断到 180 阶次; HUST-ERA5 时间分辨率为 1 小时,球谐截断到 100 阶次,上述模型积分方法都为三维数值积分,但在物理、几何参数的表达以及数据预处理流程有所差异。为便于比较,在球谐系数比较中统一使用 6 小时时间分辨率模型进行质量评估,在星间距离变率残差及月时变重力场反演的比较中,除 RL06 为 3 小时分辨率外,其余参与计算的模型都为 6 小时分辨率。

1.2 模型输入数据质量比较

大气去混频模型以大气再分析资料中垂直层的温度和比湿以及表面数据中的地表压力和表面重力位高作为输入数据^[42],文献^[43]表明输入数据的误差是影响模型精度的重要因素,因此在计算模型之前,对输入数据做简要的质量比较。

1.2.1 表面压力数据比较

文献^[44, 45]表明 ERA5 与实际观测值最为匹配,以 ERA5 表面压力为参考值,分析 CRA-40 与 CFSR, ERA-I 和 JRA55 的质量水平。其中, ERA-I 于 2018 年 8 月 31 日停止更新; CFSR 数据周期终止于 2010 年 12 月 31 日。

图 1 为几种再分析资料与 ERA5 表面压力的年均差值曲线(1979—2021 年),由于 2005 年之前同化数据源较为接近^[15],四条差值曲线变化趋势较为一致。CRA-40 与 ERA5 在同化卫星资料时都以数据更完整和质量更高的重处理产品替换实时观测资料^[32],这可能是导致 CRA-40 与 ERA5 的差异均值最小的原因; CRA-40 与 ERA5 差异的标准差最大,数据稳定性不及其它产品,可能与 2005 年后差异值陡增有关。

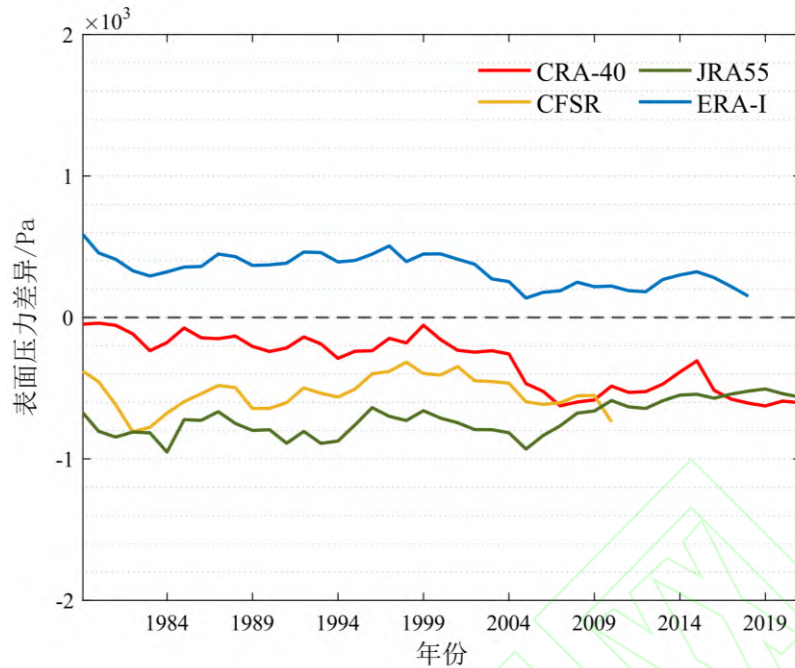


图 1 不同再分析数据表面压力数据比较

Fig.1 Comparisons in terms of Surface Pressure between CRA-40 and other Reanalysis Products.

1.2.2 垂直层温度数据比较

对垂直层温度数据进行比较，基于美国标准大气（1976）对大气平均状况的定义，在对流层下、中、上部以及平流层下部各选一处，将各再分析温度数据与其气象年均值作差。气象年均值的时间窗口为 1991—2020 年，与世界气象组织（World Meteorological Organization, WMO）对气象年均值时间窗口的最新定义相同^[46]，该时间窗口也为哥白尼气候变化中心（The Copernicus Climate Change Service, C3S）所采用^[47, 48]。为避免高纬度地表摩擦形成的逆流层影响温度分布，本文在计算温度的气象年均值时过滤了 82.5° N~82.5° S 区域外的温度数据^[23]。

图 2 中 a 对应平流层下部温度异常曲线，b、c、d 分别对应对流层上、中、下部。CRA-40 的 a、b 曲线在 1979—2000 年期间相较其它再分析的异常值更低，呈现更冷的温度变化趋势；在 2005 年之后，b 曲线呈现偏热的温度变化趋势，a 曲线与 ERA5 曲线最为接近。CRA-40 的 c、d 曲线与 CFSR 曲线较为一致，但与 ERA5 仍有一定差距。

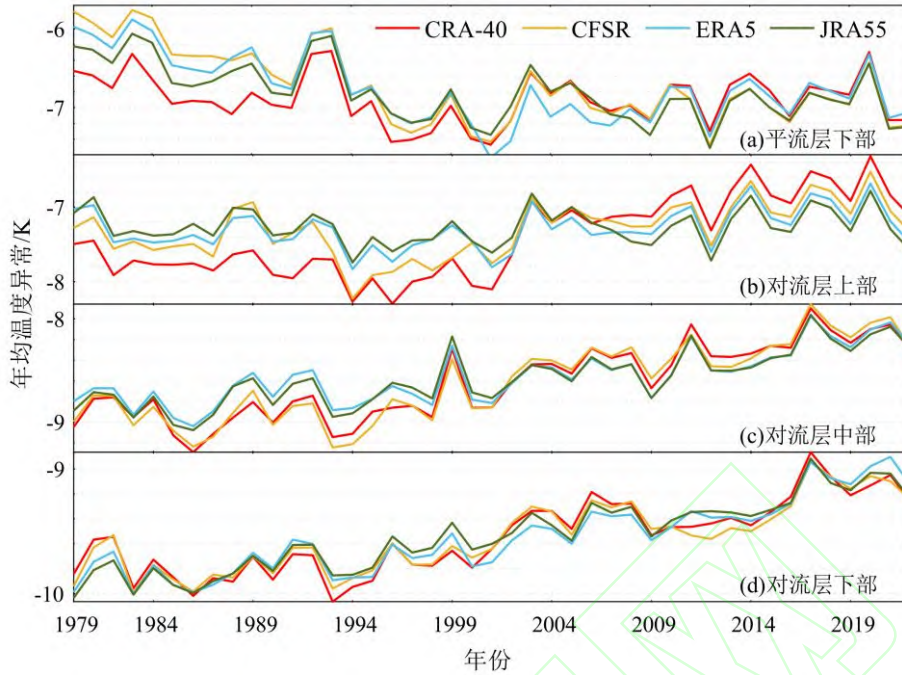


图 2 各再分析数据年均温度异常比较

Fig.2 Twelve-month Mean Temperature Anomalies for Alternative Pressure Levels.

为进一步细化 CRA-40 在气象平均值时间窗口内的质量变化,分别计算 1991-2009 年 (Time-A 段) 以及 2010—2021 年 (Time-B 段) 内 CRA-40、CFSR、JRA55 与 ERA5 温度异常曲线相关系数。由表 2 可见, 2009 年之后, CRA-40 在对流层中部到平流层下部的不同位置与 ERA5 的相关性较前一时间段有所上升, 相关系数高于 0.9。CRA-40 温度异常 RMS 与 ERA5 温度异常 RMS 的差值小于 0.2 K, 与 CFSR、JRA 温度异常 RMS 的差值小于 0.4 K, 表明 CRA-40 温度数据质量与三者较为接近。

表 2 CRA-40、CFSR、JRA55 与 ERA5 温度异常曲线相关系数及均方根误差

Tab.2 Correlation Coefficients and Root Mean Square in terms of Temperature Anomaly Curves

模型		图 2- (a)		图 2- (b)		图 2- (c)		图 2- (d)	
		Time-	Time-	Time-	Time-	Time-	Time-	Time-	Time-
		A	B	A	B	A	B	A	B
r	CRA	0.83	0.98	0.78	0.99	0.92	0.94	0.94	0.91
	CFSR	0.94	0.99	0.82	0.99	0.85	0.97	0.94	0.94
	JRA	0.88	0.99	0.90	0.99	0.97	0.99	0.98	0.96
RMS (K)	CRA	7.0	6.9	7.6	6.8	8.7	8.2	9.6	9.2
	ERA5	7.0	6.9	7.4	7.0	8.6	8.3	9.6	9.2
	CFSR	6.9	7.0	7.5	7.0	8.7	8.2	9.6	9.3
	JRA	7.0	7.0	7.4	7.2	8.6	8.2	9.5	9.2

CRA-40 表面气压和温度的质量分析表明, 表面气压数据质量与 ERA5 较为接近, 温度数据质量与第三代全球再分析基本相当。国内外多个机构使用 ERA-I、ERA5 计算大气去混频模型^[34,35,43,49], 有充分条件认为 CRA-40 有望应用于大气去混频模型计算。

2 大气去混频模型算法

大气去混频模型（后文简称 AD）是对非潮汐高频大气质量变化进行球谐分析并截断到一定阶次的球谐位系数^[50]：

$$\bar{C}_{nm} + i\bar{S}_{nm} = \frac{1+k_n}{2n+1} \frac{3}{4\pi a_{45} \bar{\rho} g_{wmo}} \iint_{\sigma} \Delta I_n \bar{P}_{nm}(\cos\theta) (\cos m\lambda + i \sin m\lambda) d\sigma \quad (1)$$

式中， $\bar{C}_{nm}, \bar{S}_{nm}$ 为 n 阶 m 次球谐位系数， i 为虚数， k_n 为负荷勒夫数， a_{45} 为 45° 余纬的平均地球半径， $\bar{\rho}$ 为地球平均密度， $g_{wmo} = 9.80665 \text{ m/s}^2$ 为 WMO 定义的重力加速度常量， ΔI_n 为扣除长期平均值的大气垂直积分扰动量， $\bar{P}_{nm}(\cos\theta)$ 为完全归一化的缔合勒让德函数， θ 为余纬， λ 为经度， $d\sigma$ 为单位面元。文献[51]指出就现有重力场精度而言可以忽略球谐分析方法的不同的影响。本文采用去平滑的球谐分析方法，该方法在一定程度上考虑了格网间数据差异^[42]，减少输入数据传入模型中的误差：

$$\bar{C}_{nm} + i\bar{S}_{nm} = -\frac{1+k_n}{2n+1} \frac{3}{4\pi a_{45} \bar{\rho} g_{wmo}} \frac{g_m}{q_n} \sum_{j=1}^{N-1} I \bar{P}_{nm}^j \sum_{k=1}^M \Delta I_{jk} (\cos m\lambda_k + i \sin m\lambda_k) \quad (2)$$

$$g_m = \begin{cases} \Delta\lambda, & m = 0 \\ \frac{[\sin(m\Delta\lambda) + i(1 - \cos(m\Delta\lambda))]}{m}, & m \neq 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中， q_n 为去平滑因子^[52]， $I \bar{P}_{nm}^j = \int_{t_j}^{t_{j+1}} \bar{P}_{nm}(t) dt$ ， $t = \cos\theta$ 为勒让德函数积分公式^[53]， m 和 n 分别对应经、纬线数目； $\Delta\lambda$ 为相邻经线角度间隔。

大气垂直积分 I_n 计算公式如下：

$$I_n = \int \left(\frac{r}{a_{45}} \right)^{n+2} \rho(\theta, \lambda, r) dr = \sum_{i=1}^{i_m} \left(\frac{a(\theta) + Z_i}{a_{45}} \right)^{n+2} \frac{P_{i+1} - P_i}{g(\theta, Z_i)} \quad (4)$$

其中， r 为地球外部质量元到地球中心的径向距离， a 为参考椭球半径， $\rho(\theta, \lambda, r)$ 为地球体密度； i 为垂直层层数， Z_i 为该层几何高度， $g(\theta, Z_i)$ 是与余纬和几何高度相关的空间重力加速度^[54]； P_i 为垂直层压力值。基于文献[35, 40]对大气垂直积分平均值时间跨度选取的研究，本文在模型计算时对时间跨度的选取均为 2003~2014 年。地表大气与起伏地形摩擦导致其数值变化较大，为避免误差传入模型，需要对表面压力做反气压计矫正的预处理，预处理流程参照文献[35]的方法。

大气质量变化以给定质量元在径向距离 $r(\theta, \lambda)$ 上的垂直积分表示，径向坐标

r 表示为椭球半径 $a(\theta)$ 、大地水准面高 $N'(\theta, \lambda)$ 、以及表面地形以上任意点几何高度 $Z(\theta, \lambda)$ 的总和:

$$r(\theta, \lambda) = a(\theta) + N'(\theta, \lambda) + Z(\theta, \lambda) \quad (5)$$

其中, 大地水准面高变化量不足 120 m, 且在全球部分区域内与 GNSS/水准实测大地高的 RMS 不足 0.1 m^[55], 因此在计算径向坐标时忽略该值, 地形以上任意点的几何高度 Z 以该点重力位高 H 表示, 重力位高 $H = \Phi / g_{WMO}$, Z 的计算公式如下^[41]:

$$T_i \approx T_i(1 + 0.608Q_i) \quad (6)$$

$$\Phi_{i-1/2} = \Phi_{i+1/2} + \frac{R_d}{g_{WMO}} T_i \ln \left(\frac{P_{i+1/2}}{P_{i-1/2}} \right) \quad (7)$$

$$Z = (1 - 0.002644 \cos 2\theta) H + (1 - 0.0089 \cos 2\theta) \frac{H^2}{6.245 \cdot 10^6} \quad (8)$$

其中, T_i 和 Q_i 分别为温度和比湿, $R_d = 287 \text{ m}^2 / (\text{s}^2 \text{ k})$ 为干空气大气常数。

3 大气去混频模型的计算及质量评估

本文基于 0.5° 空间分辨率, 6 小时时间分辨率的 CRA-40 再分析数据计算了 2019—2021 年的 CRA-40-AD, 球谐截断阶次为 180 阶; 基于 0.5° 空间分辨率, 6 小时时间分辨率的 ERA-Interim 再分析数据计算了 2019.1—2019.6 期间的 SWJTU1 模型, 球谐截断阶次为 180 阶; 基于 1° 空间分辨率, 6 小时时间分辨率的 FNL 大气再分析数据计算了 2021.4—2021.12 内的 FNL-AD 模型, 球谐截断阶次为 100 阶; 本文使用的 HUST-ERA5 模型 (2019—2020 年) 球谐截断到 100 阶, 数据获取自国家青藏高原数据中心 (<http://data.tpdc.ac.cn>)^[34, 56]。

大气去混频模型的质量评估主要从三个角度出发^[42]: 1) 基于 AD 球谐位系数比较, 大地水准面差距的谱域信号曲线表征地球重力场球谐位系数估计中的误差与不确定度^[2]; 基于主成分分析方法反映模型的时间相关性 2) 基于 GRACE 星间距离变率 (K-band Range Rate, KBRR) 残差的比较, KBRR 是 GRACE 的直接观测量, 与作为 GRACE 背景力模型的 AD 有密切关系, 基于 KBRR 残差验证模型精度的优点^[57], 文献^[58]认为 KBRR 残差越小则表明使用的背景力模型越准确; 3) 从反演月时变地球重力场角度, 将 AD 应用到重力场模型解算并将之与官方模型比较最能直观地体现其对非潮汐项高频大气质量变化的重现能力。

3.1 球谐系数比较

3.1.1 谱域比较

基于 RL06 对输入数据发布机构的选择^[35, 40, 41, 59], 本文选用以下 AD 进行谱域比较: 1) CRA-40-AD (2019—2021 年); 2) RL06 (2019—2021 年); 3) HUST-ERA5 (2019—2020 年); 4) SWJTU1 (2019.1—2019.6 年); 5) FNL-AD (2021.4—

2021.12 年)。以官方模型 RL06 为参照，2019 年为 CRA-40-AD 与 SWJTU1、HUST-ERA5 的比较，2020 年为 CRA-40-AD 与 HUST-ERA5 的比较，2021 年为 CRA-40-AD 与 FNL-AD 的比较，FNL 分析数据与实时数据的同化和预报系统相同，虽时效性有所降低但同化了更为完整的观测数据^[60]，代表 NCEP 分析资料的最优精度。

表 3 列出了各模型与 RL06 在各年间相同时刻谱域曲线的相关系数（置信度为 95%），HUST-ERA5 与 RL06 的相关系数最高，精准的捕捉了 RL06 曲线每一阶的变化趋势；CRA-40-AD 与 SWJTU 性能相近，较 FNL 略有不及。

表 3 各模型谱域曲线与 RL06 相关系数

Tab.3 Correlation Coefficients between Unofficial Models and RL06

模型	2019060100	2020060100	2021060100
CRA-40-AD	0.90	0.74	0.89
HUST-ERA5	0.99	0.99	-
SWJTU1	0.89	-	-
FNL-AD	-	-	0.93

为了进一步刻画模型间差异对反演重力场的影响量级，在谱域比较中加入 GRACE 的设计精度曲线（GRACE Baseline），真实误差曲线（actual error）以及 Bender Type 模拟误差曲线（Bender）。图 3 中可见 CRA-40-AD 与其它模型的差距基本小于 GRACE 现有精度；在约 20 阶之后，CRA-40-AD 与 RL06 等模型的差距小于 GRACE 设计精度；在约 70 阶之后，CRA-40-AD 与 RL06 的差距小于下一代重力卫星（Bender-Type）的设计精度。在与算法相同模型比较中，可见 CRA-40-AD 与 SWJTU、FNL-AD 还存在一定差距，与 HUST-ERA5 差距最大；但这些差异均小于当前 GRACE 反演时变重力场的误差，一定程度上表明了 CRA-40 大气再分析用于计算大气去混频的可行性。

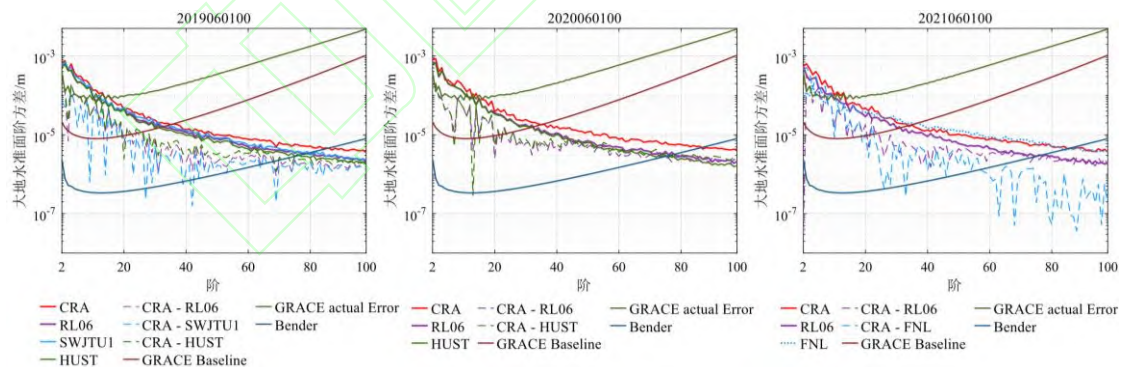


图 3 2019-2021 年各模型谱域比较

Fig.3 Spectrum curves in terms of degree variance as well as their difference of the geoid height among CRA-40, RL06, SWJTU1, HUST-ERA5 in 2019; CRA-40, RL06, HUST-ERA5 in 2020; CRA-40, RL06, NCEP-FNL in 2021.

3.1.2 时域比较

进一步评估模型时域相关性，采用主成分分析（Principle Component Analysis, PCA）方法处理 2019 年各模型 6 小时时间序列产品（其中，SWJTU 产品数为 734），将各模型时间序列分解为时空不相关的正交模式，不同模式代表了大气的

主要质量变化，每一模式的主成分元素（Principle Component, PC）代表时域部分^[34, 49]。

图 4 为第一至第四模式的主成分元素（PC）时间序列曲线。在第一模式 PC 时间序列中，CRA-40-AD、SWJTU1、HUST-ERA5 曲线的形状及数值与 RL06 非常接近，相关系数均大于 0.98；在第二、三模式中，CRA-40-AD 与 RL06 的时间序列相关系数为 0.89，相关性不及另两模型；在第四模式中，CRA-40-AD 主成分元素时间序列曲线与 RL06 相关性较差，在部分时刻的变化趋势超前或滞后于 RL06 且差异值较大，CRA-40-AD 与 RL06 第四模式差值的 RMS 为 0.23，远高于 HUST-ERA5 的 0.02 以及 SWJTU1 的 0.04。

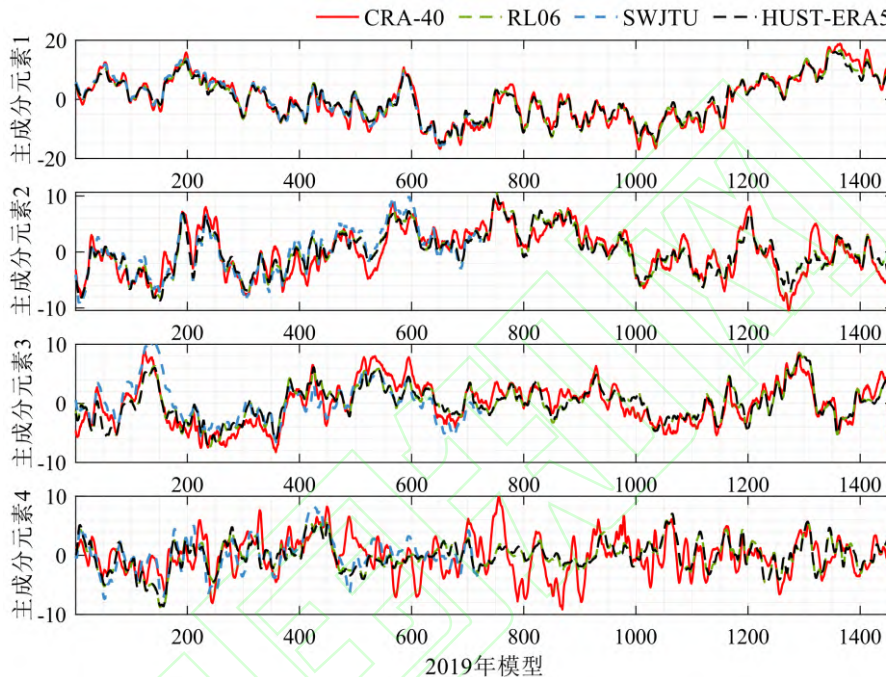


图 4 主成分元素时间序列曲线

Fig.4 Time Series in terms of the Leading Four Principle Components resulting from PCA Analysis

表 4 各模型前四模式信号占比/%

Tab.4 Percentage of the Leading Two Modes in terms of CRA-40, RL06, HUST-ERA5 and SWJTU/%

模式	CRA-40	RL06	HUST-ERA5	SWJTU
前四模式占比	46	59.3	59.3	56.4
第一模式	27.6	37.8	36.9	30.6
第二模式	7.6	10.3	10.8	11.4
第三模式	6.0	6.5	6.7	8.0
第四模式	4.8	4.7	4.9	6.4

由表 4 可见，CRA-40-AD 前四模式信号占比及其总和均低于 HUST-ERA5 与 SWJTU1；在第三、四模式中，CRA-40-AD 信号占比与 RL06 的差距较小，而在第一、二模式信号占比总和对比 RL06 有近 13% 的不足。

3.2 星间距离变率残差比较

KBRR 对重力场背景力模型以及模型间差异十分敏感，而其残差是反演重力

场模型的中间结果，比较 KBRR 残差可以衡量模型计算的观测值与实际观测值的接近程度，并且无需进行向下延拓和滤波过程，KBRR 残差越小，表明对应的大气去混频模型精度越高^[9, 49, 58]。

本文以 2009 年 3 月的 GRACE 数据为例，保留大气去混频模型以外的所有参数一致，采用动力学积分法计算了各大气去混频模型对应的星间距离变率残差，参考力模型包括地球中心引力、非球形引力、日月引力、固体潮、海潮、固体极潮、海极潮及大气潮，求解的局部非随机参数为每一弧段的初始轨道和速度向量误差及加速度偏差和尺度改正数，局部随机参数为每历元计算的摄动力误差以及轨道和星间距离变率的观测误差，全局未知参数为 96 阶的球谐位系数。基于星间距离变率观测值精度的三倍 $0.9 \mu\text{m}$ ，剔除 KBRR 残差序列（5s 时间分辨率）中的粗差以计算 KBRR 残差的均方根（Root Mean Square, RMS）^[49]，需要注意的是在重力场模型计算时未包含可能与大气去混频模型发生耦合效应的海洋去混频模型，计算时使用的 AOD1B RL06 产品大气分量为 3 小时时间分辨率。

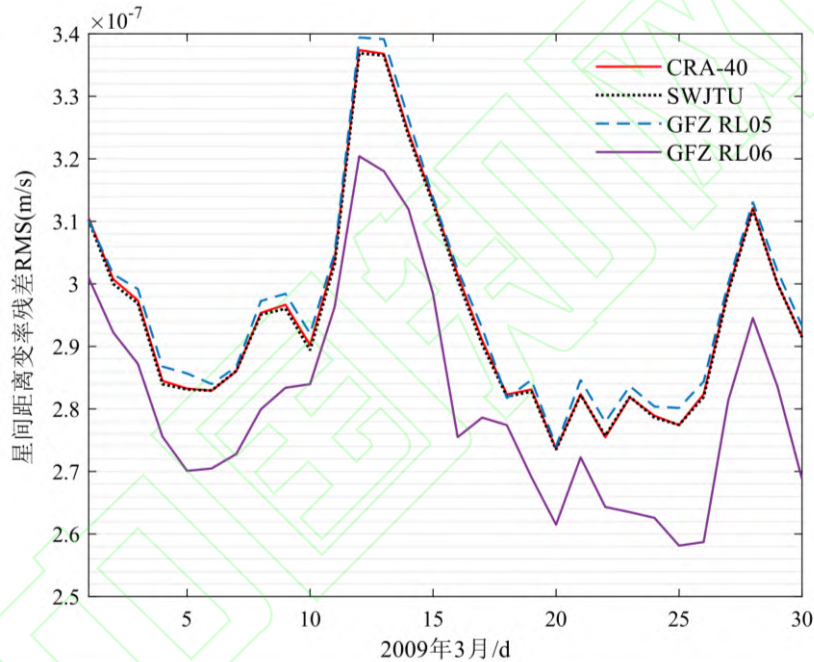


图 5 KBRR 残差 RMS 日值图

Fig.5 Daily RMS in terms of KBRR Residuals in March 2019

图 5 为 2009 年 3 月 CRA-40-AD 与 RL05、RL06 及 SWJTU1 的 KBRR 残差 RMS 日值曲线图，通过 KBRR 残差 RMS 日值曲线间的相关性反映不同大气去混频模型的精度。CRA-40-AD 与 RL05、SWJTU1 二者的相关系数为 0.99，CRA-40-AD、RL05、SWJTU1 与 RL06 的相关系数均为 0.97。为进一步细化模型间 RMS 数值差异，绘制了图 8 模型间 RMS 较差的时间序列，其中灰色点代表模型当日 KBRR 残差 RMS 较差值，红色短虚线为当月 RMS 较差均值。由图 6 可见，CRA-40-AD 整体优于 RL05，且二者 RMS 差值主要分布在均值线（-1.5 nm/s）附近；CRA-40-AD 与 RL06 的 RMS 较差均值低于 15 nm/s，其差异最值基本在 20 nm/s 以下，小于当前 GRACE K 波段测距系统的精度范围（ $\sim 100 \text{ nm/s}$ ）^[58]，但大于 GRACE Follow-On（GRACE-FO）重力卫星激光测距系统的精度区间（Laser Ranging, $\sim 1 \text{ nm/s}$ ）。

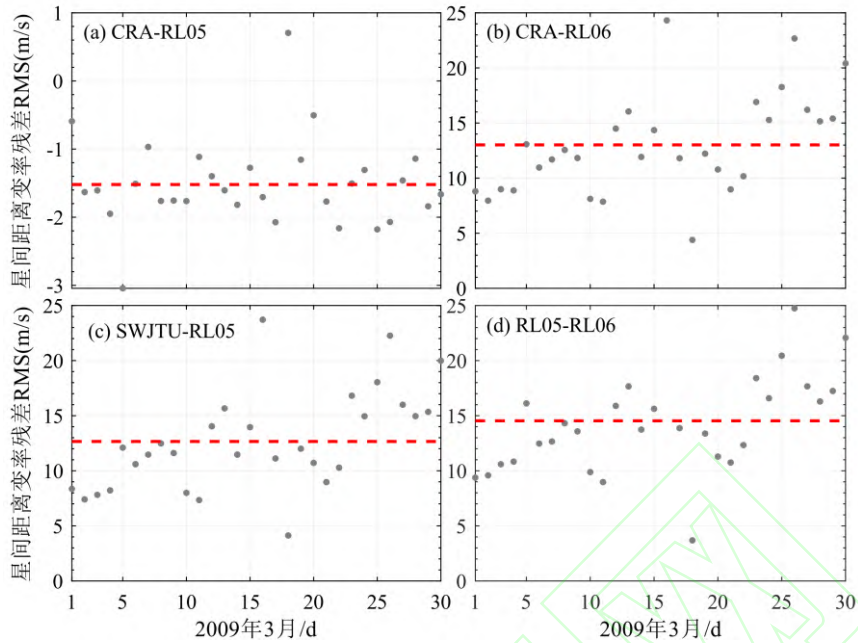


图 6 每日 KBRR RMS 较差时间序列图

Fig.6 Time Series in terms of Differences of Daily KBRR RMS

3.3 月时变重力场反演

大气去混频模型质量直接关系到时变地球重力场模型的精度，以大地水准面高阶方差表示不同大气去混频模型对时变重力场解算的影响，据此评估 CRA-40-AD 的质量，反演过程与反演算法、轨道参数、载荷误差等因素密切相关^[61]，选用不同去混频模型，其余计算参数均保持一致。

使用 2009 年 3 月的 GRACE 观测数据，按动力学两步法反演了各大气去混频模型对应的 96 阶时变地球重力场模型。计算中考虑的摄动力模型、参考框架和待估参数等策略见表 5。对 GRACE Level 1B 数据的预处理包括时间转换，坐标转换，非保守力初步校正等；处理加速度计原始数据时，每月估计一组对角尺度，每弧段估计一组偏差。随机参数包括摄动力随机噪声及轨道和星间距离变率观测误差，最小二乘方差分量估计每弧段轨道和星间距离变率的方差，自回归模型估计历元间残差的相关性。

表 5 摄动力模型及参考框架计算策略

Tab..5 Summary concerning the Strategies for Inversing Processing

计算策略	说明
摄动力模型	
平均地球引力场	GGM05S 截断至 180 阶次
N 体引力扰动	DE430 行星星历 仅考虑月球和太阳的影响
固体地球潮汐	IERS 2010 Conventions (2、3、4 阶)
海潮	EOT11a (120×120)
固体地球极潮	IERS 2010 Conventions
海洋潮汐	IERS 2010 Conventions (100×100)
大气潮汐	考虑 S1 和 S2 潮影响 ^[62]

大气非潮汐去混频模型	AOD1B RL06 (180×180)
相对论效应	IERS 2010 Conventions
非保守力	星载加速度计观测数据 ACC1B RL02 星载相机数据 SCA1B RL03
参考框架	
协议惯性参考框架	IERS 2010 Conventions
岁差/章动	IAU 2006/2000A
地球定向参数	IERS EOP 08 C04
观测值	
GRACE 轨道	ITSG 几何轨道 (300s 采样率)
KBRR	KBRR1B RL03 (5s 采样率)
待估参数	
弧段长度	24 小时
双星状态	每个弧段的位置和姿态
加速度计尺度参数	每月每轴估计一常数次
加速度计偏差参数	每弧段每轴估计一次常数
摄动力噪声随机模型	均值为 0 方差为 1.0×10^{-19} 正态分布
轨道和星间距离变率随机模型	最小二乘方差分量估计 + 自回归模型

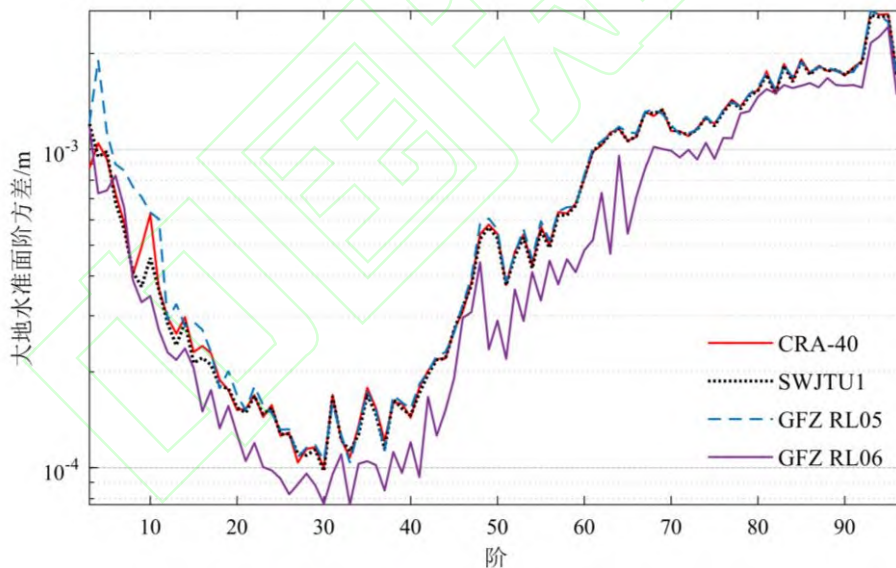


图 7 大气去混频模型反演时变重力场

Fig.7 Influence Revealing ADs on Time-Varying Gravity Field Inversion

图 7 为各模型反演月时变地球重力场的大地水准面高阶方差示意图，由图可见，CRA-40 在较低阶部分（约 30 阶之前）优于 GFZ RL05，在 30 阶之后与 RL05 质量相当，SWJTU1 相较 CRA-40 质量更优；CRA-40、SWJTU1 同 RL06 的差异最值在 0.6 mm 左右，差异的均值在 0.2 mm 以下。为进一步研究 CRA-40-AD 相较 RL05、RL06 的质量差异及其差异对现有重力场反演的影响，将 CRA-40-AD 与 RL05、RL06 大地水准面高阶方差作差，以 GRACE 现有精度、模拟精度以及下一代重力卫星精度曲线对差异量级加以刻画。在图 8 中，CRA-40-AD 与 RL05

的信号差异在约 10 阶之后低于 GRACE 实际精度，约 20 阶之后低于 GRACE 模拟精度，表明 CRA-40-AD 质量相比 RL05 低阶占优、整体相当；CRA-40-AD 与 RL06 的信号差异在约 10 阶之后低于 GRACE 实际精度，在 75 阶之前超过 GRACE 模拟精度，且就 CRA-40 与两代官方模型差异均超过了代表下一代重力卫星的最高精度曲线，表明仍需对计算大气去混频算法做出改进或是提高 CRA-40 再分析数据质量才能将其应用于时变重力场的反演。

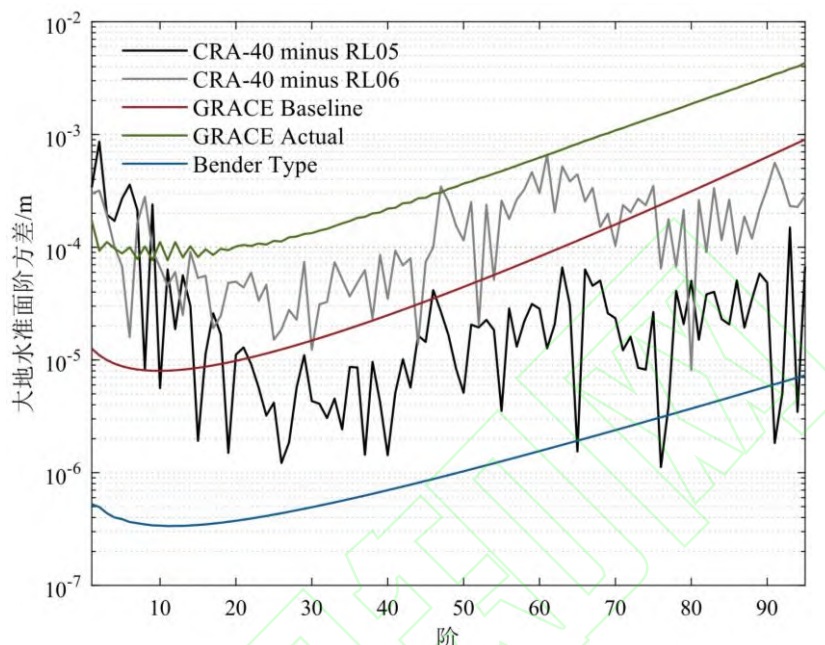


图 8 CRA-40-AD 大地水准面高与 RL05、RL06 作差比较

Fig.8 Comparisons of Geoid Degree Difference between CRA-40-AD and RL05、RL06.

4 结语

本文就中国第一代大气再分析 CRA-40 能否应用于计算大气去混频模型及其计算模型的精度开展了一系列质量分析与评估。首先对部分用作模型输入数据的 CRA-40 变量做质量分析，结果表明 CRA-40 表面压力数据质量优于国际第三代全球再分析资料，与 ERA5 表面压力质量较为接近；CRA-40 温度数据质量与 CFSR 及 JRA55 基本相当。基于 CRA-40 的质量表现，我们认为 CRA-40 大气再分析数据有望应用于大气去混频模型计算，并计算了一套 2019—2021 年的 CRA-40-AD。本文对 CRA-40-AD 的各项评估结果如下：1) 在球谐系数的比较中：与其他大气去混频模型的差距基本小于 GRACE 现有精度；CRA-40-AD 与 RL06 的相关性较好，在约 20 阶之后，与 RL06 的差距小于 GRACE 模拟精度，在约 70 阶之后，与 RL06 的差距小于下一代重力卫星 (Bender-Type) 的设计精度；PCA 的结果表明，CRA-40-AD 主要模式的信号总量与其他大气去混频模型相比有一定差距，其前三模式的时间特征与 RL06 较为一致，各模式相关系数分别为 0.98、0.89、0.89；2) 基于 KBRR 残差，本文以 2009 年 3 月数据为例比较了 CRA-40、SWJTU1、RL05、RL06 的 KBRR 残差 RMS 日值曲线，CRA-40AD 的残差表现优于 RL05，二者相关系数为 0.99；CRA-40-AD 与 RL06 的 RMS 差异幅值不足 20 nm/s，小于当前 GRACE K 波段测距系统的精度但大于 GRACE-FO 激光测距系统的精度；3) 在大气去混频模型对时变重力场解算的影响层面，CRA-40-AD

与 RL05 在低阶占优, 整体质量水平相当; CRA-40-AD 与 RL06 大地水准面高阶方差曲线的数值差异在 $0\sim 0.6\text{ mm}$ 之间, 小于 1 mm 的大地水准面精度要求, 其信号差异在约 10 阶之后低于 GRACE 实际精度, 在 75 阶之前差异超过了 GRACE 模拟精度。

基于对 CRA-40 大气再分析数据的质量分析, 我们认为中国第一代大气再分析 CRA-40 的质量水平与国际第三代再分析产品的质量相当; 基于对 CRA-40-AD 大气去混频模型的质量评估, 我们认为 CRA-40 有能力应用于计算大气去混频模型, 有望实现去混频相关产品的国产化并服务于我国自主重力卫星计划。

致谢: 本文使用的再分析数据获取自 CMA, ECMWF, RDA (The Research Data Archive at NCAR), PSL (Physical Sciences Laboratory of National Oceanic and Atmospheric Administration), 本文使用 HUST-ERA5 大气去混频产品数据由国家青藏高原科学数据中心 (<http://data.tpdc.ac.cn>) 提供, 在此对各机构表示感谢。

参考文献

- [1] LUO Zhicai, ZHONG Bo, ZHOU Hao, WU Yunlong. Progress in Determining the Earth's Gravity Field Model by Satellite Gravimetry[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(10): 1713-1727 (罗志才, 钟波, 周浩, 吴云龙. 利用卫星重力测量确定地球重力场模型的进展[J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2022, 47(10): 1713-1727)
- [2] KIM J. Simulation study of a low-low satellite-to-satellite tracking mission [M]. The University of Texas at Austin, 2000
- [3] FLECHTNER F, NEUMAYER K-H, DAHLE C, et al. What Can be Expected from the GRACE-FO Laser Ranging Interferometer for Earth Science Applications? [J]. Surveys in Geophysics, 2015, 37(2): 453-70
- [4] SAKUMURA C, BETTADPUR S, BRUINSMA S. Ensemble prediction and intercomparison analysis of GRACE time-variable gravity field models [J]. Geophysical Research Letters, 2014, 41(5): 1389-97
- [5] ELSAKA B, FOROOTAN E, ALOTHMAN A. Improving the recovery of monthly regional water storage using one year simulated observations of two pairs of GRACE-type satellite gravimetry constellation [J]. Journal of applied geophysics, 2014, 109: 195-209
- [6] ELSAKA B, FOROOTAN E, KUSCHE J, et al. Regional hydrological recovery using one year of simulated observations of the GRACE and Bender constellations [C]. the EGU General Assembly Conference Abstracts, 2014
- [7] HAN S C, JEKELI C, SHUM C. Time-variable aliasing effects of ocean tides, atmosphere, and continental water mass on monthly mean GRACE gravity field [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2004, 109(B4)
- [8] TAPLEY B D, BETTADPUR S, WATKINS M, et al. The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results [J]. Geophysical research letters, 2004, 31(9)
- [9] YANG F, FOROOTAN E, SCHUMACHER M, et al. Evaluating non-tidal atmospheric products by measuring GRACE K-band range rate residuals [J].

- Geophysical Journal International, 2018, 215(2): 1132-47
- [10] DEE D P, UPPALA S M, SIMMONS A J, et al. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system [J]. Quarterly Journal of the royal meteorological society, 2011, 137(656): 553-97
- [11] PENG G. Analysis, Reanalysis, Forecast—What’s the Difference? [J]. National Center for Atmospheric Research <https://rda.ucar.edu/datasets/ds083>, 2014, 2
- [12] DUAN J, SHUM C K, GUO J, et al. Uncovered spurious jumps in the GRACE atmospheric de-aliasing data: potential contamination of GRACE observed mass change [J]. Geophysical Journal International, 2012, 191(1): 83-7
- [13] FLECHTNER F, THOMAS M, DOBSLAW H. Improved Non-tidal Atmospheric and Oceanic De-aliasing for GRACE and SLR Satellites [M]. System Earth via Geodetic-Geophysical Space Techniques. 2010: 131-42
- [14] FOROOTAN E, DIDOVA O, SCHUMACHER M, et al. Comparisons of atmospheric mass variations derived from ECMWF reanalysis and operational fields, over 2003–2011 [J]. Journal of Geodesy, 2014, 88(5): 503-14
- [15] LI C, ZHAO T, SHI C, et al. Assessment of precipitation from the CRA40 dataset and new generation reanalysis datasets in the global domain [J]. International Journal of Climatology, 2021, 41(11): 5243-63
- [16] KISTLER R, KALNAY E, COLLINS W, et al. The NCEP–NCAR 50-year reanalysis: monthly means CD-ROM and documentation [J]. Bulletin of the American Meteorological society, 2001, 82(2): 247-68
- [17] GIBSON J, KALLBERG P, UPPALA S, et al. ECMWF re-analysis project report series: 1 [J]. ERA description, 1997, 72
- [18] TAKACS L L, MOLOD A, WANG T. Documentation of the Goddard Earth Observing System (GEOS) General Circulation Model, Version 1 [M]. National Aeronautics and Space Administration, Goddard Space Flight Center, 1994
- [19] KANAMITSU M, EBISUZAKI W, WOOLLEN J, et al. Ncep–doe amip-ii reanalysis (r-2) [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2002, 83(11): 1631-44
- [20] UPPALA S M, KALLBERG P, SIMMONS A J, et al. The ERA-40 re-analysis [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society: A journal of the atmospheric sciences, applied meteorology and physical oceanography, 2005, 131(612): 2961-3012
- [21] ONOGI K, TSUTSUI J, KOIDE H, et al. The JRA-25 reanalysis [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan Ser II, 2007, 85(3): 369-432
- [22] SAHA S, MOORTHY S, PAN H-L, et al. The NCEP climate forecast system reanalysis [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2010, 91(8): 1015-58
- [23] KOBAYASHI S, OTA Y, HARADA Y, et al. The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan Ser II, 2015, 93(1): 5-48
- [24] HERSBACH H. The ERA5 Atmospheric Reanalysis [C]. AGU fall meeting

abstracts, 2016

- [25] DEDONG L, ZHONGBO Y, ZHENCHUN H, et al. Groundwater simulation in the Yangtze River basin with a coupled climate-hydrologic model [J]. *Journal of China University of Geosciences*, 2007, 18: 155-7
- [26] LIN R, ZHOU T, QIAN Y. Evaluation of global monsoon precipitation changes based on five reanalysis datasets [J]. *Journal of Climate*, 2014, 27(3): 1271-89
- [27] SHEN C, ZHA J, WU J, et al. Does CRA-40 outperform other reanalysis products in evaluating near-surface wind speed changes over China? [J]. *Atmospheric Research*, 2022, 266: 105948
- [28] SUN Q, MIAO C, DUAN Q, et al. A review of global precipitation data sets: Data sources, estimation, and intercomparisons [J]. *Reviews of Geophysics*, 2018, 56(1): 79-107
- [29] RAMON J, LLEDÓ L, TORRALBA V, et al. What global reanalysis best represents near-surface winds? [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2019, 145(724): 3236-51
- [30] LIANG X, JIANG L, PAN Y, et al. A 10-yr global land surface reanalysis interim dataset (CRA-Interim/Land): Implementation and preliminary evaluation [J]. *Journal of Meteorological Research*, 2020, 34(1): 101-16
- [31] LIU H, SHI C, JIANG L. CRA-40/Atmosphere: The first-generation Chinese Atmospheric Reanalysis (1979–2018): System Description and Performance Evaluation [J]. 2022
- [32] WANG M, YAO S, JIANG L, et al. Collection and pre-processing of satellite remote sensing data in CRA-40 (CMA's global atmospheric ReAnalysis) [J]. *Adv Meteorol Sci Technol*, 2018, 8: 158-63 (王旻燕, 姚爽, 姜立鹏, 等. 我国全球大气再分析 (CRA-40) 卫星遥感资料的收集和预处理 [J]. *气象科技进展*, 2018, 8(1): 158-63)
- [33] BERGMANN-WOLF I, FOROOTAN E, KLEMMANN V, et al. Updating ESA's Earth System Model for gravity mission simulation studies: 2. Comparison with the original model [J]. 2014
- [34] YANG F, FOROOTAN E, WANG C, et al. A New 1-Hourly ERA5-Based Atmosphere De-Aliasing Product for GRACE, GRACE-FO, and Future Gravity Missions [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2021, 126(9)
- [35] YOU Wei, XIONG Dawei, FANG Weihao. Strategies and Analysis for the Computation of GRACE Atmospheric De-Aliasing Models [J]. *Progress in Geophysics* (游为, 熊大伟, 方伟浩. GRACE 大气去混频模型计算的若干策略分析 [J]. *地球物理学进展*)
- [36] YU X, ZHANG L, ZHOU T, et al. The Asian subtropical westerly jet stream in CRA-40, ERA5, and CFSR reanalysis data: Comparative assessment [J]. *Journal of Meteorological Research*, 2021, 35(1): 46-63
- [37] LIAO J, HU K, JIANG H, et al. Pre-process and data selection for assimilation of conventional observations in the CMA global atmospheric reanalysis [J]. *Adv Meteorol Sci Technol*, 2018, 8: 133-42

- [38] YIN J, LIANG X, CHEN F. Development of atmospheric data assimilation techniques and regional reanalysis datasets in the East Asia [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2018, 8: 79-84
- [39] HERSBACH H, BELL B, BERRISFORD P, et al. The ERA5 global reanalysis [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, 146(730): 1999-2049
- [40] DOBSLAW H, FLECHTNER F, BERGMANN-WOLF I, et al. Simulating high-frequency atmosphere-ocean mass variability for dealiasing of satellite gravity observations: AOD1B RL05 [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(7): 3704-11
- [41] DOBSLAW H, BERGMANN-WOLF I, DILL R, et al. A new high-resolution model of non-tidal atmosphere and ocean mass variability for de-aliasing of satellite gravity observations: AOD1B RL06 [J]. *Geophysical Journal International*, 2017, 211(1): 263-9
- [42] ZENNER L. Atmospheric and oceanic mass variations and their role for gravity field determination [D]; Technische Universität München, 2013
- [43] FOROOTAN E, DIDOVA O, KUSCHE J, et al. Comparisons of atmospheric data and reduction methods for the analysis of satellite gravimetry observations [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2013, 118(5): 2382-96
- [44] FAN W, LIU Y, CHAPPELL A, et al. Evaluation of global reanalysis land surface wind speed trends to support wind energy development using in situ observations [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2021, 60(1): 33-50
- [45] DENG K, AZORIN-MOLINA C, MINOLA L, et al. Global near-surface wind speed changes over the last decades revealed by reanalyses and CMIP6 model simulations [J]. *Journal of Climate*, 2021, 34(6): 2219-34
- [46] WMO guidelines on the calculation of climate normals. Tech. rep. WMO-No.1203, Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization; 2017, p. 18
- [47] Changing the reference period from 1981–2020 to 1991–2020 for the C3S climate bulletin, 2021, URL https://climate.copernicus.eu/sites/default/files/2021-02/C3S_Climate_Bulletin_change_from_1981-2010_to_1991-2020_reference_period_v08-Feb-20_all.pdf
- [48] SAENZ-AGUIRRE A, ULAZIA A, IBARRA-BERASTEGI G, et al. Floating wind turbine energy and fatigue loads estimation according to climate period scaled wind and waves [J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 271: 116303
- [49] YOU Wei, SU Yong, YU Biao, et al. Computation of GRACE Atmospheric De-aliasing Models Using ERA-Interim Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(6): 810-816 (游为, 苏勇, 余彪, 等. 利用 ERA-Interim 数据计算 GRACE 大气去混频模型 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2017, 42(6): 810-6)
- [50] BOY J P, CHAO B F. Precise evaluation of atmospheric loading effects on Earth's time-variable gravity field [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*,

- 2005, 110(B8)
- [51] YOU Wei.. Impact of Spherical Harmonic Analysis Methods on the computation of GRACE Atmosphere De-Aliasing Models [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics. 2017, 37(4): 397-402 (游为.球谐分析方法对 GRACE 大气去混频模型计算的影响 [J]. 大地测量与地球动力学, 2017, 37(4): 397-402)
- [52] COLOMBO O L. Numerical methods for harmonic analysis on the sphere [R]: Ohio State Univ Columbus Dept of Geodetic Science And Surveying, 1981
- [53] PAUL M. Recurrence relations for integrals of associated Legendre functions [J]. Bulletin Geodesique, 1978, 52(3): 177-90
- [54] PETIT G, LUZUM B. IERS technical note no. 36 [J]. IERS conventions, 2010, 179.
- [55] ZINGERLE P, PAIL R, GRUBER T, et al. The combined global gravity field model XGM2019e [J]. Journal of Geodesy, 2020, 94(7): 1-12
- [56] Yang, F., Luo, Z. (2021). HUST-ERA5, an hourly global atmospheric de-aliasing product (2002-2020). National Tibetan Plateau/Third Pole Environment Data Center(杨帆, 罗志才. 逐小时全球大气去混频产品 HUST-ERA5 (2002-2020) [J]. 国家青藏高原科学数据中心, 2021)
- [57] EICKER A, FOROOTAN E, SPRINGER A, et al. Does GRACE see the terrestrial water cycle “intensifying”? [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2016, 121(2): 733-45
- [58] YANG Fan. Recovery and refinement of the Earth temporal gravity fields from GRACE observations [D]. Huazhong University of Science&Technology, 2017 (杨帆. GRACE 时变重力场的解算和精化 [D]. 华中科技大学, 2017)
- [59] FLECHTNER F. AOD1B product description document for product releases 01 to 04 (Rev. 3.1, April 13, 2007) [J]. GRACE project document, 2007: 327-750
- [60] PENG G. What’s the difference between FNL and GFS [J]. National Center for atmospheric research <https://rda.ucar.edu/datasets/ds083>, 2014, 2
- [61] XIAO Yun, WANG Yunpeng, LIU Xiaogang, XU Yunyan. Application of Space-Wise Least Square Method to Error Analysis for Satellite Gravimetry[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(3): 340-346 (肖云, 王云鹏, 刘晓刚, 许云燕. 空域最小二乘法用于重力卫星误差分析 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2019, 44(3): 340-346)
- [62] BIANCALE R, BODE A. Mean annual and seasonal atmospheric tide models based on 3-hourly and 6-hourly ECMWF surface pressure data [J]. 2006

网络首发:

标题: 基于中国 CRA-40 再分析数据计算大气去混频模型及其质量评估

作者: 熊大伟, 游为, 余彪, 刘充, 范东明

Doi: 10.13203/j.whugis20220790

收稿日期: 2023-10-06

引用格式:

熊大伟, 游为, 余彪, 等. 基于中国 CRA-40 再分析数据计算大气去混频模型及其质量

评估[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, Doi:10.13203/j.whugis20220790. (XIONG Dawei, YOU Wei, YU Biao, et al. Computation and Assessment concerning Atmospheric Dealiasing Models Using CRA-40 Reanalysis Dataset[J] *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, Doi:10.13203/j.whugis20220790.)

