引文格式:熊大伟,游为,余彪,等.利用中国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),2025,50(4):727-738.DOI:10.13203/j.whugis20220790

Citation: XIONG Dawei, YOU Wei, YU Biao, et al. Computation and Mass Assessment Concerning Atmospheric Dealiasing Models Using CRA-40 Reanalysis Dataset[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, 50(4): 727-738. DOI:10.13203/j.whugis20220790

利用中国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,随着中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。比较中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)的表面压力与温度数据,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(atmospheric dealiasing, AD)模型CRA-40-AD,从球谐系数、星间距离变率残差、反演时变重力场3个层面评估其质量。评估结果表明,CRA-40-AD与德国地学研究中心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阶之后小于重力恢复与气候实验(gravity recovery and climate experiment,GRACE))的模拟精度;CRA-40-AD与RL06的星间距离变率残差均方根差异不足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AD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AD产品的完全国产化。

关键词:AD模型;CRA-40;再分析数据集;重力场模型;GRACE;质量评估

中图分类号:P223 **文献标识码**:A **收稿日期**:2023-01-20

DOI:10.13203/j.whugis20220790 **文章编号**:1671-8860(2025)04-0727-12

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

XIONG Dawei[1] *YOU Wei*[1] *YU Biao*[1] *LIU Chong*[1] *FAN Dongming*[1]

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 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**: The 40 year global reanalysis dataset released by China Meteorological Administration(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 make. A set of AD (atmospheric dealiasing) models, CRA-40-AD, is calculated by using CRA-40 as input data. To investigate the applicability of employing CRA-40 to calculate AD model, the validation of resulted models is carried out from three aspects including spherical harmonic coefficients, K-band range rate (KBRR) residuals and geoid heights derived from time-variable gravity field models. **Results**: The results

基金项目: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。xxxdw@my.swjtu.edu.cn

通信作者:游为,博士,副教授。youwei@swjtu.edu.cn

of the evaluations indicate that CRA-40-AD exhibit a strong correlation with GFZ AOD1B RL06 (RL06) in both spectral and time domains. The differences between CRA-40-AD and RL06 in spectral domain are smaller than the GRACE simulation accuracy after 20 orders. The root mean square differences of KBRR residuals between CRA-40-AD and RL06 are below 20 nm/s, which conforms to the accuracy of gravity recovery and climate experiment (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 AD models, making the fully localization of AD products promising to achieve.

Key words: AD model; CRA-40; reanalysis datasets; gravity fields; GRACE; mass assessment

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]。自重力恢复与气候实验(gravity recovery and climate experiment, GRACE)及其下一代GRACE-FO(GRACE Follow-on)重力卫星发射以来,其解算的时变地球重力场精度不及模拟精度[2]。文献[3]指出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或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影响而发生变化,有利于大气去混频(atmospheric dealiasing, AD)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AD模型。

再分析模式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)和美国国家大气研究中心(National Center for Atmospheric Research, 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(ECMWF reanalysis-15 years, ERA-15)[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NCEP和美国能源部(United States Department of Energy, DOE)联合研制的NCEP/DOE[19]、ECMWF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(Japanese 25 year atmospheric reanalysis, JRA-25)[21];第三代全球再分析主要包括NCEP的气候预测系统再分析(climate forecast system reanalysis, CFSR)[22]、ECMWF的中期再分析(ECMWF reanalysis interim, ERA-Interim,后文简写为ERA-I)[10]、JMA的55年再分析计划(Japanese 55 year atmospheric reanalysis, JRA55)[23];ECMWF的ERA5[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]。是否拥有自主研制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。国家气象信息中心已制成并发布了10年再分析试制产品(10-year global reanalysis interim dataset released by CMA, CRA-Interim)(2007—2016年)以及中国第一代全球大气再分析产品(40 year global reanalysis dataset released by CMA, 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研究中心(Deutsches Geo Forschungs Zentrum, GFZ)、美国航天研究中心、喷气实验室之外,欧洲航天局[33]以及波恩大学大地测量与地理信息

研究所[14]也发布了自主计算的AD产品;中国国内发布AD模型的机构主要有华中科技大学[34]以及西南交通大学[35]等。本文比较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AD模型计算,并以其为输入数据计算了一套大气AD模型CRA-40-AD,与多种大气AD模型开展一系列质量评估,研究中国自有大气再分析数据能否作为中国重力卫星背景场建模的输入数据。

1　数据分析

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AD模型,其他参与模型计算及比较的数据集有CFSR、ERA-I、ERA5、JRA55和NCEP最终分析(NCEP final analysis, FNL),各数据集预报模型和同化方法略有差异:JRA55预报系统为数值天气预报系统(numerical weather prediction, NWP),ERA-I、ERA5使用综合预报系统(integrated forecast system, IFS)进行预报,CFSR、FNL的预报系统为全球预报系统(global forecast system, GFS),CRA-40基于NCEP GFS开展本土移植与优化;在同化模型方面,仅有FNL基于全球数据同化系统(global data assimilation system, GDAS)进行数据同化。其余数据集都在变分同化系统内进行同化,此外,CFSR还使用了三维变分格网统计插值方法(3DVar gridpoint statistical interpolation, 3DVar-GSI)[36-38]。再分析数据主要质量特征见表1。

表1　再分析数据主要质量特征

Table 1　Main Characteristics of Reanalysis Datasets

数据质量特征	CRA-40	ERA5	EAR-I	CFSR	JRA55	FNL
发布机构	CMA	ECMWF	ECMWF	NCEP	JMA	NCEP
时间分辨率/h	6	1	6	6	6	6
空间分辨率/(°)	0.5	0.25	0.5	0.5	2.5	1
垂直分辨率/层	47	137	60	37	37	40
预报模型	GFS改进[38]	IFS	IFS	GFS	NWP	GFS
同化方法	三维变分	整体四维变分[39]	四维变分	3DVar-GSI	四维变分	GDAS

1.1.2　AD模型

在对CRA-40-AD的质量评估中,除了使用与本文相同算法、基于ERA-I再分析数据计算的SWJTU1模型[35]和基于FNL数据计算的FNL-AD模型外,也应用了其他机构发布的AD模型,包括官方模型GFZ AOD1B RL05(RL05)[40]、GFZ AOD1B RL06(RL06)[41]以及华中科技大学杨帆团队[34]基于ERA5计算的HUST-ERA5(简写为HUST)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 h,球谐截断到180阶次;RL06时间分辨率为3 h,球谐截断到180阶次;HUST时间分辨率为1 h,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方面有所差异。为便于比较,在球谐系数比较中统一使用6 h时间分辨率模型进行质量评估,在星间距离变率(K-band range rate, KBRR)残差及月时变重力场反演的比较中,除RL06为3 h分辨率外,其余参与计算的模型都为6 h分辨率。

1.2　模型输入数据质量比较

AD模型以大气再分析资料中垂直层的温度、比湿以及表面数据中的地表压力、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,对输入数据进行质量比较。

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],4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,数据稳定性不及其他产品,可能与2005年后差异值陡增有关。

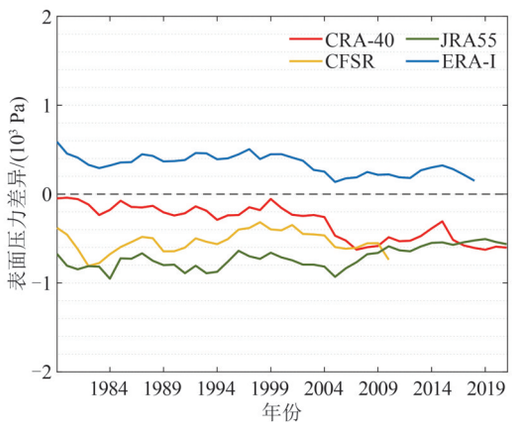


图1 CRA-40与不同再分析产品表面压力数据的比较

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年)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(a)表示的是平流层下部温度异常曲线,图2(b)、2(c)、2(d)分别表示对流层上、中、下部。图2(a)、2(b)中的CRA-40曲线在1979—2000年期间相较其他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,图2(b)中的CRA-40曲线呈现偏热的温度变化趋势,而图2(a)中的CRA-40曲线与ERA5曲线最为接近。图2(c)与图2(d)中的CRA-40曲线与CFSR曲线较为一致,但与ERA5曲线仍有一定差距。

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(时段*A*)以及2010—2021年(时段*B*)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温度异常均方根(root mean square, 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。

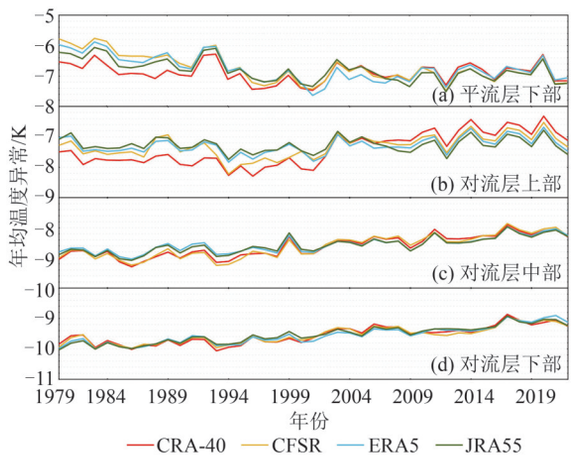


图2 垂直层间年均温度异常比较

Fig. 2 Annual Mean Temperature Anomalies for Alternative Pressure Levels

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

Table 2 Correlation Coefficients and RMS in Terms of Temperature Anomaly Curves(CRA-40, CFSR, JRA55 and ERA5)

评价指标	AD模型	图2(a)		图2(b)		图2(c)		图2(d)	
		时段*A*	时段*B*	时段*A*	时段*B*	时段*A*	时段*B*	时段*A*	时段*B*
相关系数	CRA-40	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
	JRA55	0.88	0.99	0.90	0.99	0.97	0.99	0.98	0.96
RMS/K	CRA-40	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
	JRA55	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AD模型[34-35, 43, 49],有充分条件认为CRA-40有望应用于AD模型计算。

2 AD模型算法

AD模型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]:

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

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}=9.806 65 m/s²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;$\mathrm{d}\sigma$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,其计算公式为[52]:

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

$$g_m=\begin{cases}\Delta\lambda, m=0\\ \dfrac{\sin(m\Delta\lambda)+\mathrm{i}\big(1-\cos(m\Delta\lambda)\big)}{m}, m\neq 0\end{cases} \tag{3}$$

式中,q_n为去平滑因子[51];$I\bar{P}^{j}_{nm}=\int_{t_j}^{t_{j+1}}\bar{P}_{nm}(t)\mathrm{d}t$,$t=\cos\theta$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的计算公式为:

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

式中,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校正的预处理,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:

$$r(\theta,\lambda)=a(\theta)+N'(\theta,\lambda)+Z(\theta,\lambda) \tag{6}$$

式中,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$H=\Phi/g_{\mathrm{WMO}}$,Z的计算公式为[41]:

$$T_{V_i}\approx T_i(1+0.608Q_i) \tag{7}$$

$$\Phi_{i-1/2}=\Phi_{i+1/2}+\frac{R_d}{g_{\mathrm{WMO}}}T_{V_i}\ln\left(\frac{P_{i+1/2}}{P_{i-1/2}}\right) \tag{8}$$

$$Z=(1-0.002\,644\cos2\theta)H+(1-0.008\,9\cos2\theta)\frac{H^2}{6.245\times10^6} \tag{9}$$

式中,i为垂向真实层数,$i-1/2$、$i+1/2$表示两真实层间的虚拟层;T_i和Q_i分别为温度和比湿;T_{V_i}为虚拟层温度;$R_d=287\ \mathrm{m^2/(s^2k)}$为干空气大气常数,$k$为波尔兹曼常数,$k=1.38\times10^{-23}$ J/K。

3　AD模型的计算及质量评估

本文采用0.5°空间分辨率、6 h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;采用0.5°空间分辨率、6 h时间分辨率的ERA-I再分析数据计算了2019年1月至2019年6月期间的SWJTU1模型,球谐截断阶次为180阶;采用1°空间分辨率、6 h时间分辨率的FNL大气再分析数据计算了2021年4月至2021年12月的FNL-AD模型,球谐截断阶次为100阶;本文使用的HUST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]。

AD模型的质量评估主要从3个角度出发[42]:(1)基于AD球谐位系数的比较,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];利用主成分分析(principle component analysis, PCA)方法反映模型的时间相关性。(2)基于GRACE 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应用于重力场模型解算,并将之与官方模型比较,能最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

根据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(2019—2020年)；(4)SWJTU1(2019年1月至2019年6月)；(5)FNL-AD(2021年4月至2021年12月)。以官方模型RL06为参照，2019年为CRA-40-AD与SWJTU1、HUST比较，2020年为CRA-40-AD与HUST比较，2021年为CRA-40-AD与FNL-AD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与RL06的相关系数最高，精准地捕捉了RL06曲线每一阶的变化趋势；CRA-40-AD与SWJTU1性能相近，较FNL略有不及。

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、真实误差曲线以及模拟误差曲线。图3为2019—2021年各模型谱域阶方差及较差比较，其中，2019年为CRA-40-AD、RL06、SWJTU1、HUST的比较，2020年为CRA-40-AD、RL06、HUST的比较，2021年为CRA-40-AD、RL06、NCEP-FNL的比较。图3中，将CRA-40-AD简写为CRA。从图3中可见，CRA-40-AD与其他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的设计精度。在与算法相同模型的比较中，可见CRA-40-AD与SWJTU1、FNL-AD还存在一定差距，与HUST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AD的可行性。

表3 各模型谱域曲线与RL06相关系数

Table 3 Correlation Coefficients in Terms of Spectrum Curves Between Unofficial Models and RL06

AD模型	2019-06-01T 00:00:00	2020-06-01T 00:00:00	2021-06-01T 00:00:00
CRA-40-AD	0.90	0.74	0.89
HUST	0.99	0.99	
SWJTU1	0.89		
FNL-AD			0.93

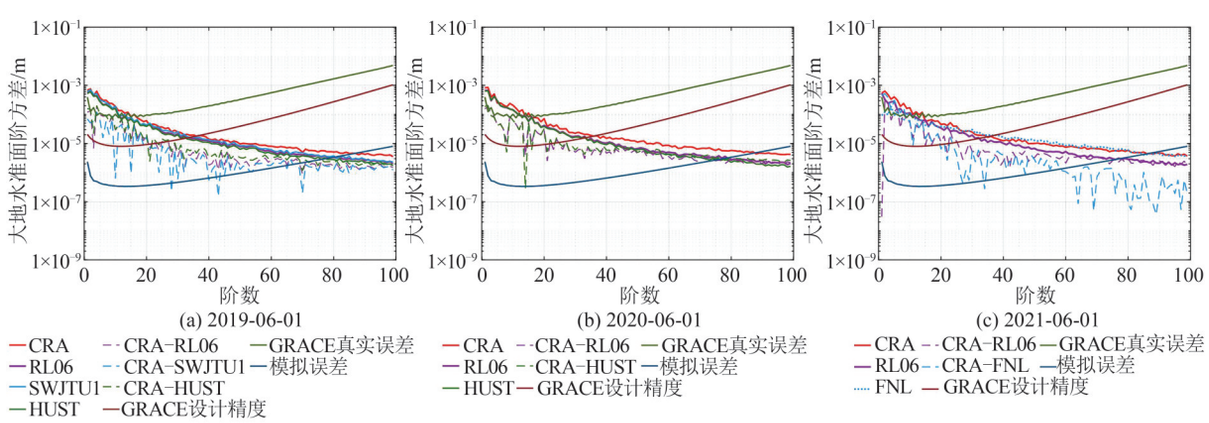


图3 2019—2021年各模型谱域阶方差及较差比较

Fig. 3 Spectrum Curves in Terms of Degree Variance as Well as Their Difference of the Geoid Height over the Period of 2019 to 2021

3.1.2 时域比较

进一步评估模型时域相关性，采用PCA方法处理，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2019年各模型6 h时间序列产品的第一至第四模式PC时间序列曲线(其中，SWJTU1产品数为734，其余模型产品数为1 420)。在第一模式PC时间序列中，CRA-40-AD、SWJTU1、HUST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，相关性不及另两个模型；在第四模式中，CRA-40-AD PC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 的 0.02 以及 SWJTU1 的 0.04。

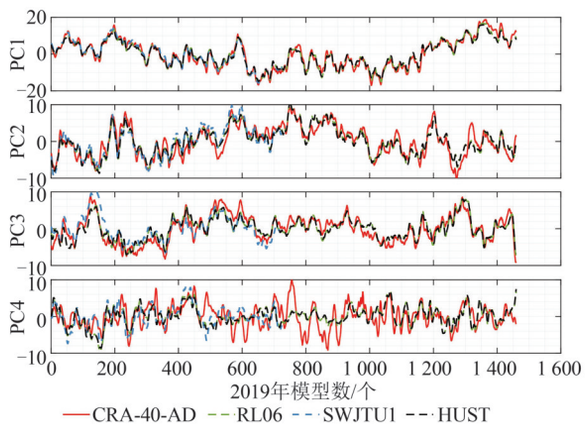


图 4　信号占比前 4 位主成分元素时间序列曲线

Fig. 4　Leading Four PC Time Series in Terms of Variable AD Models

由表 4 可见，CRA-40-AD 前四模式信号占比及其总和均低于 HUST 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。

表 4　各模型前 4 模式信号占比/%

Table 4　Percentage of the Leading 4 Modes in Terms of CRA-40-AD, RL06, HUST and SWJTU1/%

模式	CRA-40-AD	RL06	HUST	SWJTU1
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
前四模式占比	46	59.3	59.3	56.4

3.2　KBRR 残差比较

KBRR 对重力场背景力模型以及模型间的差异十分敏感，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 AD 模型精度越高[9, 49, 58]。

本文以 2009 年 3 月 1 日至 3 月 30 日的 GRACE 数据为例，采用动力学积分法计算各 AD 模型对应的 KBRR 残差，除 AD 模型外，计算过程中所有参数均保持一致。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 KBRR 的观测误差，全局未知参数为 96 阶的球谐位系数。基于 KBRR 观测值精度的 3 倍 0.9 μm，剔除 KBRR 残差序列（5 s 时间分辨率）中的粗差以计算 KBRR 残差的 RMS[49]，需要注意的是，在重力场模型计算时未包含可能与 AD 模型发生耦合效应的海洋 AD 模型，计算时使用的 AOD1B RL06 产品大气分量为 3 h 时间分辨率。

图 5 为 CRA-40-AD 与 RL05、RL06 及 SWJTU1 的 KBRR 残差 RMS 日值图，通过 KBRR 残差 RMS 日值曲线间的相关性反映不同 AD 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，绘制了模型间 RMS 较差的时间序列（见图 6），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。图 6 中，CRA-40-AD 简写为 CRA。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（约 100 nm/s）[58]，但大于 GRACE-FO 重力卫星激光测距系统的精度区间（约 1 nm/s）。

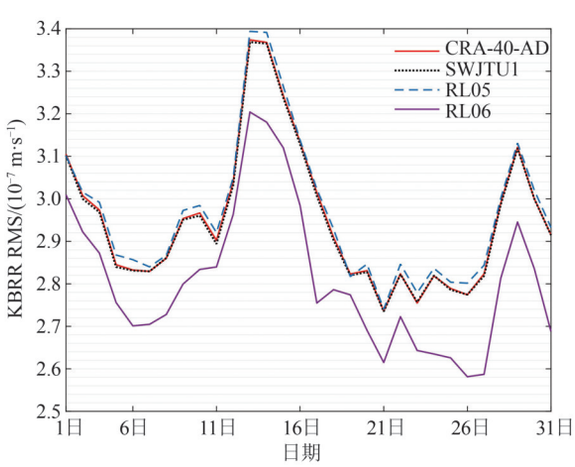


图 5　2019 年 3 月 KBRR 残差 RMS 日值图

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

3.3　月时变重力场反演

大气 AD 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 AD 模型对时变重力场解算的影响，据此评

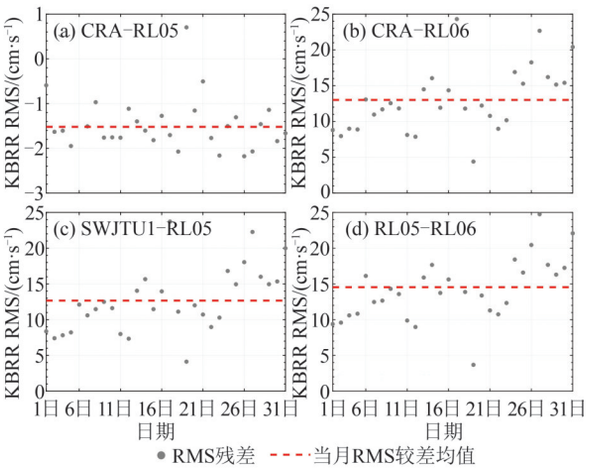


图6 2019年3月KBRR RMS较差时间序列

Fig. 6 Time Series in Terms of Differences of Daily KBRR RMS in March 2019

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AD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AD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KBRR观测误差,最小二乘方差分量估计每弧段轨道和KBRR的方差,自回归模型估计历元间残差的相关性。

表5 时变重力场反演过程计算策略

Table 5 Summary Concerning the Calculating Strategies for Inversing Time-Varying Gravity Field

参数类型	具体参数	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AD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(300 s采样率)
	KBRR	KBRR1B RL03(5 s采样率)
待估参数	弧段长度	24 h
	双星状态	每个弧段的位置和姿态
	加速度计尺度参数	每月每轴估计一次常数
	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}的正态分布
	轨道和KBRR随机模型	最小二乘方差分量估计 + 自回归模型

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,CRA-40-AD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-AD质量更优;CRA-40-AD、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(见图8)。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-AD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 AD 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。

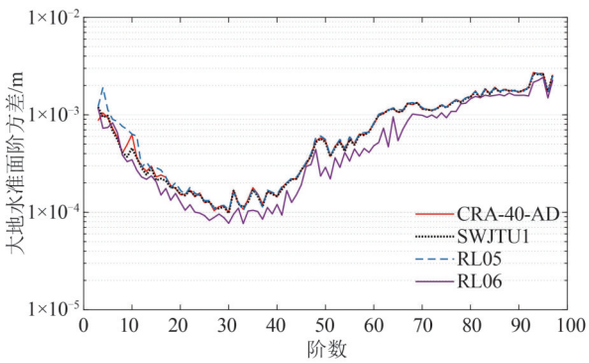


图 7　AD 模型反演时变重力场

Fig. 7 Time-Varying Gravity Field Inversion on the Basis of AD Models

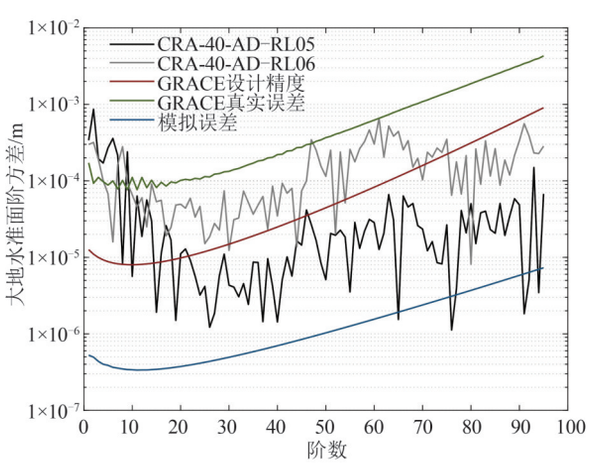


图 8　CRA-40-AD 大地水准面阶方差与 RL05、RL06 作差比较

Fig. 8　Comparison of Geoid Degree Difference Between CRA-40-AD and RL05, RL06

4　结　语

本文就 CRA-40 能否应用于计算 AD 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，可认为 CRA-40 大气再分析数据有望应用于 AD 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 AD 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 AD 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-AD、SWJTU1、RL05、RL06 的 KBRR 残差 RMS 日值曲线，CRA-40-AD 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 AD 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 0～0.6 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。

对 CRA-40 大气再分析数据的质量分析结果表明，CRA-40 的质量水平与国际第三代再分析产品的质量相当。对 CRA-40-AD AD 模型的质量评估结果表明，CRA-40 有能力应用于计算 AD 模型，有望实现 AD 相关产品的国产化并服务于中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、美国国家大气研究中心研究数据档案、美国国家海洋和大气管理局物理科学实验室，使用的 HUSTAD 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] 罗志才，钟波，周浩，等. 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.
LUO Zhicai，ZHONG Bo，ZHOU Hao，et al. 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.

[2] KIM J. Simulation Study of a Low-Low Satellite-to-Satellite Tracking Mission[M]. Austin：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*, 2016, 37(2): 453-470.

[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): 1389-1397.

[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]//EGU General Assembly, Viena, Austria, 2014.

[7] HAN S C, JEKELI C, SHUM C K. 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): B04403.

[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): L09607.

[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): 1132-1147.

[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): 553-597.

[11] PENG G. Analysis, Reanalysis, Forecast: What's the Difference? [EB/OL]. (2014-11-4)[2022-09-28]. https://rda.ucar.edu/datasets/ds083.

[12] DUAN J B, SHUM C K, GUO J Y, et al. Uncovered Spurious Jumps in the GRACE Atmospheric Dealiasing Data: Potential Contamination of GRACE Observed Mass Change[J]. *Geophysical Journal International*, 2012, 191(1): 83-87.

[13] FLECHTNER F, THOMAS M, DOBSLAW H. Improved Non-tidal Atmospheric and Oceanic Dealiasing for GRACE and SLR Satellites[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010.

[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): 503-514.

[15] LI C X, ZHAO T B, SHI C X, 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): 5243-5263.

[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): 247-268.

[17] GIBSON J, KALLBERG P, UPPALA S, et al. ECMWF Re-analysis Project Report Series 1, ECMWF[R]. United Kingdom: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, 1997.

[18] TAKACS L L, MOLOD A, WANG T N. Documentation of the Goddard Earth Observing System (GEOS) General Circulation Model, Version 1[EB/OL]. (1995-01-01)[2022-10-17]. https://ntrs.nasa.gov/citations/19950017109.

[19] KANAMITSU M, EBISUZAKI W, WOOLLEN J, et al. NCEP - DOE AMIP-II Reanalysis (R-2)[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(11): 1631-1643.

[20] UPPALA S M, KåLLBERG P, SIMMONS A J, et al. The ERA-40 Re-analysis[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 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, MOORTHI S, PAN H, et al. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2010, 91(8): 1015-1058.

[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*, 2015, 93(1): 5-48.

[24] HERSBACH H. The ERA5 Atmospheric Reanalysis[C]//AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, 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: 155-157.

[26] LIN R P, ZHOU T J, QIAN Y. Evaluation of Global Monsoon Precipitation Changes Based on Five Reanalysis Datasets[J]. *Journal of Climate*, 2014, 27(3): 1271-1289.

[27] SHEN C, ZHA J L, 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 H, MIAO C Y, DUAN Q Y, 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): 3236-3251.

[30] LIANG X, JIANG L P, PAN Y, et al. A 10 a Global Land Surface Reanalysis Interim Dataset (CRA-Interim/Land): Implementation and Preliminary Evaluation[J]. *Journal of Meteorological Research*, 2020, 34(1): 101-116.

[31] LIU Z Q, JIANG L P, SHI C X, et al. CRA-40/Atmosphere: The First-Generation Chinese Atmospheric Reanalysis (1979—2018): System Description and Performance Evaluation[J]. *Journal of Meteorological Research*, 2023, 37(1): 1-19.

[32] 王旻燕, 姚爽, 姜立鹏, 等. 中国全球大气再分析(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.
WANG Minyan, YAO Shuang, JIANG Lipeng, et al. Collection and Pre-processing of Satellite Remote Sensing Data in CRA-40 (CMA's Global Atmospheric ReAnalysis) [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2018, 8: 158-163.

[33] BERGMANN-WOLF I, FOROOTAN E, KLEMANN V, et al. Updating ESA's Earth System Model for Gravity Mission Simulation Studies: 2. Comparison with the Original Model [R]. Potsdam : Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, 2014.

[34] YANG F, FOROOTAN E, WANG C Q, et al. A New 1-Hourly ERA5-Based Atmosphere Dealiasing Product for GRACE, GRACE-FO, and Future Gravity Missions[J]. *Journal of Geophysical Research* (*Solid Earth*), 2021, 126(9): e2021JB021926.

[35] 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, 2023, 38(3):1059-1073.
YOU Wei, XIONG Dawei, FANG Weihao. Strategies and Analysis for the Computation of GRACE Atmospheric De-aliasing Models [J]. *Progress in Geophysics*, 2023, 38(3):1059-1073.

[36] YU X J, ZHANG L X, ZHOU T J, 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] 廖捷, 胡开喜, 江慧, 等. 全球大气再分析常规气象观测资料的预处理与同化应用[J]. 气象科技进展, 2018, 8(1): 133-142.
LIAO Jie, HU Kaixi, JIANG Hui, et al. Pre-process and Data Selection for Assimilation of Conventional Observations in the CMA Global Atmospheric Reanalysis[J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2018, 8(1): 133-142.

[38] 尹金方, 梁旭东, 陈锋, 等. 东亚区域大气再分析技术研究及资料集建设[J]. 气象科技进展, 2018, 8(1): 79-84.
YIN Jinfang, LIANG Xudong, CHEN Feng, et al. Development of Atmospheric Data Assimilation Techniques and Regional Reanalysis Datasets in the East Asia[J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2018, 8(1): 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): 3704-3711.

[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): 263-269.

[42] ZENNER L. Atmospheric and Oceanic Mass Variations and Their Role for Gravity Field Determination [D]. München: 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): 2382-2396.

[44] FAN W X, 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 Q, 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): 2219-2234.

[46] WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals[R]. Tech. Rep. WMO-No. 1203. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2017.

[47] Changing the Reference Period from 1981—2020 to 1991—2020 for the C3S Climate Bulletin[EB/OL]. (2021-02-09)[2022-07-07]. 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] 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): 810-816.
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.

[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): B08412.

[51] 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.
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.

[52] COLOMBO O L. Numerical Methods for Harmonic Analysis on the Sphere [R]. Columbus, USA: Ohio State University, 1981.

[53] PAUL M K. Recurrence Relations for Integrals of Associated Legendre Functions [J]. *Bulletin Géodésique*, 1978, 52(3): 177-190.

[54] PETIT G, LUZUM B. IERS Technical Note No. 36 [R]. Frankfurt am Main, German: IERS Conventions, 2010.

[55] ZINGERLE P, PAIL R, GRUBER T, et al. The Combined Global Gravity Field Model XGM2019e [J]. *Journal of Geodesy*, 2020, 94(7): 66.

[56] 杨帆, 罗志才. 逐小时全球大气去混频产品HUST-ERA5(2002-2020)[R]. 国家青藏高原科学数据中心,中国北京, 2021.
YANG Fan, LUO Zhicai. HUST-ERA5, an Hourly Global Atmospheric De-aliasing Product (2002—2020)[R]. National Tibetan Plateau/Third Pole Environment Data Center, Wuhan, China, 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): 733-745.

[58] 杨帆. GRACE时变重力场的解算和精化[D]. 武汉:华中科技大学, 2017.
YANG Fan. Recovery and Refinement of the Earth Temporal Gravity Fields from GRACE Observations [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2017.

[59] Flechtner F. AOD1B Product Description Document for Product Releases 01 to 04 (Rev. 3.1) [EB/OL]. (2007-4-13)[2021-11-1]. https://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/GRACE_AOD1B_GRAV_GFZ_RL04.

[60] PENG G. What's the Difference Between FNL and GFS[EB/OL]. (2015-04-22)[2022-08-15]. https://rda ucar edu/datasets/ds083.

[61] 肖云, 王云鹏, 刘晓刚, 等. 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.
XIAO Yun, WANG Yunpeng, LIU Xiaogang, et al. 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.

[62] BIANCALE R, BODE A. Mean Annual and Seasonal Atmospheric Tide Models Based on 3-Hourly and 6-Hourly ECMWF Surface Pressure Data[R]. Potsdam, German: GeoForschungsZentrum Potsdam, 2006.