

引文格式:GAO Chunchun, LU Yang, ZHANG Zizhan, et al. Evaluation and Analysis of GOCE Earth Gravity Field Model in Qinghai-Tibet Region[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2014, 43(1): 21-29. (高春春, 陆洋, 张子占, 等. GOCE 地球重力场模型在青藏地区的评价及分析[J]. 测绘学报, 2014, 43(1): 21-29.) DOI: 10. 13485/j. cnki. 11-2089. 2014. 0004

GOCE 地球重力场模型在青藏地区的评价及分析

高春春^{1,2}, 陆 洋¹, 张子占^{1,3}, 史红岭^{1,4}, 杜宗亮^{1,2}, 朱传东^{1,2}

1. 中国科学院 测量与地球物理研究所 大地测量与地球动力学国家重点实验室, 湖北 武汉 430077;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 美国得克萨斯大学 空间研究中心, 德克萨斯州 奥斯汀 78759;
4. 极地测绘科学国家测绘地理信息局重点实验室, 湖北 武汉 430000

Evaluation and Analysis of GOCE Earth Gravity Field Model in Qinghai-Tibet Region

GAO Chunchun^{1,2}, LU Yang¹, ZHANG Zizhan^{1,3}, SHI Hongling^{1,4}, DU Zongliang^{1,2}, ZHU Chuan-dong^{1,2}

1. State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Center for Space Research, University of Texas at Austin, Austin 78759, USA; 4. Key Laboratory for Polar Surveying and Mapping Science of State Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, Wuhan 430000, China

Abstract : The precision of the GOCE gravity field models in Qinghai-Tibet area is tested by GPS-leveling and gravity anomaly data. And a new filter method is introduced as a reference in the course of gravity testing. The results show that the medium order of GOCE models is better than other typical models in Qinghai-Tibet area. The next, the differences between GOCE-only model and the other three models are computed respectively in terms of geoid and gravity anomaly in Qinghai-Tibet region. Then the spatial and the field sources depth distribution which is first derived from statistic analysis method of the big difference are discussed. Based on the calculation results, some conclusions have been drawn as follows: ① in the horizontal direction, the obvious difference between the GOCE models and other typical models appear in the region where landform is complex such as Himalayas, Tianshan, et al; ② in the downwards direction, the large difference focus on the lithosphere.

Key words : GOCE; the Earth's gravity field model; GPS-leveling; gravity anomaly; Qinghai-Tibet region; depth of field sources; lithosphere

摘 要: 分别采用青藏地区的 GPS/水准和重力异常实测数据对 GOCE 重力场模型进行外部测试, 并在重力异常验证过程中引入一种新的滤波方法。验证结果表明在青藏地区 GOCE 重力场模型相比其他系列模型的优势在于中波段。同时, 探讨 GOCE 重力场模型与其他系列模型在青藏地区主要差异值的空间分布以及首次利用统计分析方法找出模型之间主要差异值的阶次分布。得出如下结论: ① 模型之间的较大差异值在空间水平方向上主要分布在喜马拉雅山脉、天山等地形起伏较大的区域; ② 在垂直方向上主要集中在岩石圈。

关键词: GOCE; 地球重力场模型; GPS/水准; 重力异常; 青藏地区; 场源深度; 岩石圈

中图分类号: P228

文献标识码: A

文章编号: 1001-1595(2014)01-0021-09

基金项目: 国家 973 计划(2013CB733301; 2012CB957703); 国家自然科学基金(41274025; 41174064; 41021003; 40904020); 大地测量与地球动力学国家重点实验室自主项目(Y309511052); 中国科学院测量与地球物理研究所重要方向项目(Y309451048); 极地测绘科学国家测绘地理信息局重点实验室开放

基金(201204);国家海洋局极地科学重点实验室开放研究基金(KP201202)

1 引言

2009年3月17日ESA(European Space Agency)的GOCE(gravity field and steady-state ocean circulation explorer)卫星成功发射升空,标志着SGG(satellite gravity gradiometry)技术的首次实现,同时也是继CHAMP(challenging mini-satellite payload)、GRACE(gravity recovery and climate experiment)之后第3颗重力计划卫星的成功实施。GOCE卫星的科学目标是测定高精度和高空间分辨率的静态重力场,空间分辨率可达80~100 km,重力异常精度为 $1 \times 10^{-5} \sim 2 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,大地水准面误差限制在 $1 \sim 2 \text{ cm}^{[1-2]}$ 。至今,GOCE卫星已传回大量数据,GOCE数据参与解算的系列静态地球重力场模型^[3-9]由ESA等相关研究机构对外公布。国内方面,文献^[10]利用61 d的GOCE数据,采用高低卫跟踪和卫星重力梯度数据联合恢复重力场的最小二乘谱组合法,反演了2个180阶次的地球重力场模型WHU_GOCE_SC01S和WHU_GOCE_SC02S,结果显示整体精度优于GOCE时域解,而与GOCE空域解的精度相近。

随着多个GOCE重力场模型的公布,其在全球各地区的适用性和精度评价开始成为各国研究人员关心的课题。如图1所示,GO_CONS_GCF_2_TIM_R2模型^[9](8个月GOCE数据)与其他系列代表性模型重力异常的比较显示:全球差异较大的区域主要集中在南美洲、非洲、青藏高原、南极等重力数据较少或空白的地区;中国差异较大的区域主要集中在西部地区特别是青藏高原等地形比较复杂、重力数据相对缺乏的区域。由SGG的测量原理和技术特点可知^[1],GOCE数据相比其他重力卫星数据的优势在于中波段,而这种优势在地形复杂的区域往往会更加重要。而青藏高原作为世界上形成时代最晚、面积最大、平均海拔最高的高原,是地球上一个非常独特的地理单元,其地形十分复杂,地壳巨厚,地震和构造运动活跃,特别是整个高原的隆升机制以及喜马拉雅

雅山系的形成等一些基本问题,至今存在许多争议,因此一直以来青藏地区是国际地学研究的中心和热点^[11-12]。

重力学方法作为地球物理学和大地测量学的传统方法,在青藏高原构造运动和隆升进程研究中发挥着十分重要的作用,因此本文选取最高阶为250阶的GO_CONS_GCF_2_TIM_R2(下文简称GOCE-only(I)模型)、GO_CONS_GCF_2_TIM_R3^[9](下文简称GOCE-only(II)模型(18个月GOCE数据))和GOCO02S^[4](8个月GOCE、7年GRACE、8年CHAMP、5年5个卫星的SLR数据)共3个GOCE重力场模型为验证对象,选择青藏地区作为研究区域,分别利用青藏地区GPS/水准和重力异常数据对GOCE重力场模型进行了外部测试。在测试过程中同时引入其他系列具有代表性的重力场模型(EGM2008^[13], EGM96^[14], ITG-Grace2010s^[15], IGG05B(内部使用模型))作为比较,并对GOCE重力场模型与其他系列模型在青藏地区主要差异值的水平空间与垂直场源分布进行了详细的探讨和分析。

2 选用数据资料

2.1 重力场模型数据

本文共选用了7个具有代表性的重力场模型(GOCE-only(I)、GOCE-only(II)、GOCO02S、ITG-Grace2010s、EGM2008、EGM96、IGG05B),选用模型在国外的GPS/水准验证结果(表1)显示:GOCE重力场模型精度很高,可达35~40 cm。图2为选用模型的内符合误差评价(IGG05B模型解算过程中未给出内符合误差)。从图2中可以清楚看出:①GOCE重力场模型相比其他模型的优势在于160阶前后的中波段;②GOCE-only(II)模型相比GOCE-only(I)模型精度有所改善;③GOCO02S相比GOCE-only(I)和GOCE-only(II)模型精度总体有所改善,特别是长波部分有了明显的改善。

表 1 不同重力场模型在国外的 GPS/水准验证结果^[16](均方根)

Tab. 1 The GPS/leveling verification results of different gravity field models from aboard(RMS)

m

模型名称(最大阶)	美国/6169 个点	加拿大/1930 个点	欧洲/1235 个点	澳大利亚/201 个点
GOCE-only(I)(250)	0.436	0.355	0.434	0.376
GOCE-only(II)(250)	0.430	0.343	0.417	0.357
GOCO02S (250)	0.435	0.352	0.434	0.372
ITG-Grace2010s(180)	0.548	0.459	0.595	0.523
EGM2008(2190)	0.248	0.126	0.208	0.217
EGM96(360)	0.379	0.357	0.478	0.297
IGG05B(360)	0.388	—	0.325	—

2.2 GPS/水准和重力异常数据

本文采用的 GPS/水准数据为青藏地区 GPS A/B 级网及其基于 A/B 网的 GPS 水准联测数据,共 260 个点。采用重力异常数据空间分辨率为 5'×5',数据范围为 70°E—150°E 和 25°N—40°N,该范围内中国地区主要采用我国实测重力数据,国外地区以及数据空白区由国外相关研究机构发布的重力数据进行填充,然后通过重力归算和改正,最终生成分辨率为 5'×5'的重力异常(Δg_{real})格网数据。

3 GOCE 重力场模型在青藏地区的评价与分析

3.1 GOCE 重力场模型的 GPS/水准验证

3.1.1 GPS/水准的验证方法

重力场模型计算 GPS/水准点高程异常的公式为^[17]

$$\zeta_M = \frac{GM}{(r_e + h)\gamma} \sum_{n=2}^N \left(\frac{a}{r_e + h}\right)^n \sum_{m=0}^n (\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\cos \theta) \quad (1)$$

式中,GM 为地心引力常数;n 和 m 分别为阶次;N 为重力场模型的最大阶;θ 和 λ 分别是余纬和经度;r_e 为参考椭球面到地心的距离;h 为 GPS 所测的大地高;γ 为正常重力;a 为椭球长半径; \bar{C}_{nm} 和 \bar{S}_{nm} 为完全正规化的 Stokes 球谐系数; \bar{P}_{nm} 为归一化的缔合勒让德多项式。

GPS/水准点的实测高程异常计算公式为

$$\zeta_{real} = h - H \quad (2)$$

式中,H 为水准所测的正常高。于是模型与实测高程异常的差值为

$$\Delta\zeta = \zeta_M - \zeta_{real} \quad (3)$$

3.1.2 GPS/水准验证结果

分别采用上述 7 个重力场模型的不同最大截断阶数(90、120、150、180、250、360、720、2190),严

格利用式(1)一式(3)进行计算,结果见表 2。从表 2 可以看出:① 我国 GPS/水准所测与重力场模型计算所得的高程异常之间存在较大的系统偏差,约占总体误差 70%左右,系统偏差可能是由于水准网以及我国高程基准与全球大地水准面之间的系统偏差引起^[18],为了有效消除系统偏差本文采用四参数模型^[17,19],系统偏差消除后精度得到明显改善(见表 2 中消除系统偏差后的标准差值);② 由 EGM2008 模型验证结果来看,重力场模型系数在 720 阶以后,对高程异常精度的改善已不明显,验证结果与文献[18]基本一致;③ GOCE-only(I)、GOCE-only(II)以及 GOCO02S 模型验证结果相比显示 GOCE-only(II)模型以及多个卫星数据的 GOCO02S 模型相比 GOCE-only(I)模型精度均有所改善,但改善幅度均不明显;④GOCE 重力场模型与其他系列模型验证结果横向比较显示 GOCE 重力场模型在 150、180 阶相比 EGM2008 精度有所改善,而相比 EGM96 模型整体精度都有所改善。

3.2 GOCE 重力场模型的重力异常验证

3.2.1 重力异常的验证方法

由重力场模型计算大地水准面上重力异常的公式^[17]为

$$\Delta g_M = \frac{GM}{r_e^2} \sum_{n=2}^N (n-1) \left(\frac{a}{r_e}\right)^n \sum_{m=0}^n (\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\cos \theta) \quad (4)$$

则模型与实测重力异常的差值为

$$\delta\Delta g = \Delta g_M - \Delta g_{real} \quad (5)$$

3.2.2 重力异常的验证结果

地球重力场模型不同的截断阶数,所对应的空间分辨率(半波长)也不相同,其具体关系为

$$\lambda_{\frac{1}{2}} = \frac{180^\circ}{N} \quad (6)$$

表 2 不同模型与 GPS/水准高程异常的比较结果

Tab. 2 Statistical Information of height anomaly differences between different degree of different gravity field models and GPS/leveling m

最大阶次		90	120	150	180	250	360	720	2190	
GOCE-only(I)	最小值	-1.156	-0.433	-0.465	-0.430	-0.675	—	—	—	—
	最大值	7.849	5.625	3.658	2.685	2.530	—	—	—	—
	均值	2.188	1.663	1.248	1.081	0.796	—	—	—	—
	标准差	2.226	1.506	1.164	0.933	0.747	—	—	—	—
	改正后	0.901	0.560	0.443	0.334	0.285	—	—	—	—
GOCE-only(II)	最小值	-1.145	-0.423	-0.452	-0.440	-0.708	—	—	—	—
	最大值	7.858	5.636	3.685	2.696	2.458	—	—	—	—
	均值	2.187	1.663	1.248	1.082	0.765	—	—	—	—
	标准差	2.227	1.507	1.167	0.937	0.735	—	—	—	—
	改正后	0.899	0.558	0.442	0.335	0.284	—	—	—	—
GOCO02S	最小值	-1.148	-0.426	-0.457	-0.425	-0.662	—	—	—	—
	最大值	7.866	5.632	3.683	2.711	2.554	—	—	—	—
	均值	2.193	1.670	1.256	1.150	0.809	—	—	—	—
	标准差	2.227	1.508	1.165	0.901	0.751	—	—	—	—
	改正后	0.900	0.558	0.439	0.283	0.279	—	—	—	—
ITG-GRACE 2010s	最小值	-1.158	-0.435	-0.439	-0.718	—	—	—	—	—
	最大值	7.860	5.627	3.730	3.017	—	—	—	—	—
	均值	2.192	1.670	1.252	1.046	—	—	—	—	—
	标准差	2.225	1.505	1.164	1.013	—	—	—	—	—
	改正后	0.901	0.552	0.440	0.391	—	—	—	—	—
EGM2008	最小值	-1.172	-0.492	-0.444	-0.496	-0.875	-0.350	-0.184	-0.111	—
	最大值	7.850	5.653	3.842	2.751	2.132	1.109	0.891	0.876	—
	均值	2.187	1.659	1.263	1.041	0.674	0.448	0.325	0.320	—
	标准差	2.220	1.473	1.191	0.960	0.704	0.378	0.281	0.280	—
	改正后	0.997	0.467	0.456	0.361	0.290	0.144	0.101	0.098	—
EGM96	最小值	-1.656	-0.713	-0.638	-0.759	-1.116	-0.702	—	—	—
	最大值	8.884	5.807	3.906	2.987	2.810	2.261	—	—	—
	均值	2.145	1.634	1.299	1.118	0.782	0.586	—	—	—
	标准差	2.367	1.566	1.192	1.021	1.020	0.799	—	—	—
	改正后	1.015	0.608	0.451	0.393	0.387	0.384	—	—	—
IGG05B	最小值	-1.148	-0.572	-0.551	-0.482	-0.506	-0.362	—	—	—
	最大值	7.891	5.545	3.829	3.205	2.209	1.874	—	—	—
	均值	2.186	1.682	1.339	1.180	0.878	0.712	—	—	—
	标准差	2.233	1.487	1.146	0.960	0.726	0.553	—	—	—
	改正后	0.906	0.544	0.409	0.331	0.253	0.184	—	—	—

注：“改正后”指采用四参数模型消除系统偏差后的标准差值

本文采用重力场模型最大截断阶数分别为 90、120、150、180、250、360，验证中采用了两种滤波方法：① 利用式(4)计算生成空间分辨率为 $2^\circ \times 2^\circ$ 、 $1.5^\circ \times 1.5^\circ$ 、 $1.2^\circ \times 1.2^\circ$ 、 $1^\circ \times 1^\circ$ 、 $0.72^\circ \times 0.72^\circ$ 、 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的重力异常格网数据，再采用空域高斯低通滤波将实测数据 $5' \times 5'$ 的格网值转换成与重力场模型截断阶数相对应的分辨率，然后按式(5)进行计算；② 取各重力场模型的最大阶利用式(4)计算生成分辨率 $5' \times 5'$ 的重力异常格网值，然后与实测重力异常数据一同采用空域高

斯滤波生成相应的空间分辨率，再利用式(5)进行计算，结果见表 3。

从表 3 可以看出：① 第 2 种方法的验证结果比第 1 种方法的标准差整体小 $5 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2 \sim 1 \times 10^{-4} \text{ m/s}^2$ 的量级，精度显著提高(由于第 1 种方法中重力场模型在截取阶次时相当于在频域里面进行了一次低通滤波，而实测数据是在空域里进行滤波，因此两种数据不能在同一尺度进行比对，而第 2 种方法很好地解决了这个问题，这将为今后利用重力场模型计算格网数据时提供一种新的滤波方

法);② 随着空间分辨率的提高,模型与实测数据之间的差异值逐渐增大,原因在于地形起伏的影响随着空间分辨率的提高越来越显著;③ GOCE-only(I)、GOCE-only(II)与 GOCO02S 这 3 个模型在青藏地区的精度相当;④ GOCE重力场模型与其他系列模型横向比较显示 EGM96 模型验证结果总体精度相对较差,IGG05B 模型结果总体较好(由于

IGG05B 模型解算过程中加入了中国地区的实测重力数据,因此 IGG05B 模型与实测数据符合较好),在 120 阶前,GOCE 重力场模型与 EGM2008 模型精度相当,但在 150、180 和 250 阶,GOCE 重力场模型的精度都要优于 EGM2008; GOCE 重力场模型与 ITG-GRACE2010s 模型精度相当,但分辨率要高于 ITG-GRACE2010s 模型。

表 3 不同重力场模型在青藏地区重力异常验证结果①和②

Tab. 3 Statistical Information ① and ② of gravity anomaly differences between different degree of different gravity field models and measured data 10⁻⁵ m/s²

截断阶次		90		120		150		180		250		360	
空间分辨率		2°×2°		1.5°×1.5°		1.2°×1.2°		1°×1°		0.72°×0.72°		0.5°×0.5°	
验证结果		①	②	①	②	①	②	①	②	①	②	①	②
GOCE-only(I)	最小值	-47.89	-14.29	-63.97	-33.96	-71.15	-30.47	-72.34	-53.63	-105.94	-80.54	—	—
	最大值	43.14	28.10	63.05	46.90	79.38	52.81	95.52	66.29	106.24	77.25	—	—
	均值	0.83	0.65	1.23	0.98	0.45	0.38	0.62	0.56	0.72	0.67	—	—
	标准差	18.18	6.01	19.62	9.05	22.78	11.12	22.60	13.22	23.64	16.27	—	—
GOCE-only(II)	最小值	-48.03	-18.33	-79.87	-38.27	-90.06	-35.79	-72.46	-61.02	-112.03	-82.37	—	—
	最大值	43.06	30.01	70.35	45.25	86.85	55.26	95.34	79.87	109.04	78.41	—	—
	均值	0.82	0.85	0.89	0.65	0.62	0.65	0.62	0.72	0.70	0.73	—	—
	标准差	18.20	6.22	19.54	8.96	22.14	11.07	22.62	13.28	23.52	16.32	—	—
GOCO02S	最小值	-48.04	-14.16	-64.16	-33.76	-71.02	-30.29	-72.27	-53.19	-104.63	-79.69	—	—
	最大值	43.00	28.17	63.21	46.64	79.52	52.77	95.51	65.39	106.11	77.25	—	—
	均值	0.84	0.66	1.24	0.71	0.46	0.38	0.63	0.57	0.73	0.68	—	—
	标准差	18.17	6.00	19.61	8.75	22.77	11.10	22.59	13.17	23.50	16.20	—	—
ITG-GRACE2010s	最小值	-48.06	-12.73	-64.23	-27.73	-71.37	-40.54	-77.32	-43.12	—	—	—	—
	最大值	42.97	29.32	63.28	41.87	78.98	58.08	99.64	70.10	—	—	—	—
	均值	0.92	0.68	1.24	0.63	0.44	0.40	0.59	0.59	—	—	—	—
	标准差	18.25	5.87	19.62	8.56	22.73	11.20	23.04	13.40	—	—	—	—
EGM2008	最小值	-48.67	-22.04	-74.21	-19.85	-70.74	-54.21	-77.27	-77.52	-94.83	-89.26	-144.84	-121.16
	最大值	40.54	32.14	70.68	40.08	93.98	79.57	97.68	70.32	115.16	97.50	179.30	161.95
	均值	0.84	0.58	1.19	0.54	0.43	0.23	0.60	0.30	0.59	0.54	0.64	0.56
	标准差	18.04	6.549	19.76	8.63	22.61	12.62	22.84	13.78	25.90	18.36	29.53	23.78
EGM96	最小值	-49.41	-35.74	-48.53	-47.31	-78.44	-53.33	-107.77	-87.69	-127.29	-108.77	-187.51	-155.63
	最大值	44.37	47.64	76.59	73.08	132.52	139.38	130.57	86.88	285.12	245.19	349.16	296.40
	均值	0.86	0.65	1.06	0.53	0.46	0.40	0.59	0.36	0.49	0.47	0.61	0.55
	标准差	19.20	9.93	20.86	13.18	24.59	16.31	25.46	15.94	29.95	22.47	32.92	26.64
IGG05B	最小值	-47.79	-12.58	-63.70	-16.22	-64.27	-23.53	-70.42	-27.58	-59.50	-35.37	-72.18	-51.89
	最大值	42.97	21.98	62.02	28.77	77.62	47.23	65.35	40.17	91.28	69.19	133.01	96.54
	均值	0.85	0.66	1.27	0.75	0.67	0.52	0.82	0.67	0.77	0.76	0.89	0.81
	标准差	18.00	5.07	19.17	6.79	20.23	8.96	18.28	9.49	18.75	12.40	20.18	14.87

4 GOCE 重力场模型与其他系列模型的差异性分析

4.1 GOCE 重力场模型与其他系列模型主要差异值的水平空间分布

本文选取 EGM2008、EGM96、IGG05B 和 GOCE-only(I) (由于 GOCE-only(I)、GOCE-

only(II)和 GOCO02S 3 个模型彼此之间在青藏地区验证结果差别甚微,因此只取 GOCE-only(I)模型作比较)4 个重力场模型,最大阶次都取 250,根据式(1)和式(4)分别计算出各模型在青藏地区的大地水准面起伏和重力异常,然后将 EGM2008、EGM96、IGG05B 模型分别与 GOCE-only(I)模型进行比较。结果(图 3)显示,3 个模

型与 GOCE-only(I)模型的总体差异虽然各不相同。但是主要差异值的分布呈现一致性,都分布在喜马拉雅山脉、昆仑山等地形较为复杂的高山区。从表 4 可知,在青藏地区 GOCE-only(I)模型与 EGM2008 模型最为符合,IGG05B 次之,EGM96 最差,但在中国边境内 GOCE-only(I)模型与 IGG05B 最为符合,EGM2008 次之,EGM96 最差。

表 4 EGM2008、EGM96、IGG05B 模型与 GOCE-only(I)模型比较的数值结果(标准差)

Tab. 4 The numerical results of difference between GOCE-only(I) and EGM2008, EGM96, IGG05B (standard deviation)

GOCE-only(I)/其他模型	青藏地区	中国境内	数据类型
EGM2008	0.565	0.234	大地水准面/m
EGM96	1.535	0.726	
IGG05B	0.607	0.201	
EGM2008	14.335	6.245	重力异常/ (10 ⁻⁵ m/s ²)
EGM96	25.519	15.369	
IGG05B	15.785	5.846	

4.2 GOCE 重力场模型与其他系列模型主要差异值的阶次与垂直场源分布

虽然通过图 3 能够分别以大地水准面和重力异常的形式得知 GOCE-only(I)模型与 EGM2008、EGM96 和 IGG05B 模型主要差异值的水平空间分布,但是却无法得知其主要差异值的在地球内部的垂直分布,根据文献[20]给出的重力场球谐函数阶次(n)与场源深度(D)的简单近似关系式

$$D = \frac{R}{n-1} \quad (R \text{ 为地球平均半径}, R=6371 \text{ km}) \quad (7)$$

表 5 GOCE-only(I)模型与其他系列模型在青藏地区差异值的阶次与垂直场源深度分布

Tab. 5 The degree and depth of field sources distribution of the main difference value between GOCE-only(I) and other typical models in Qinghai-Tibet region

GOCE-only(I)/其他模型	N _{min} ~N _{max} /阶	D _{min} ~D _{max} /km	场源深度	数据类型
EGM2008	96~247, 97~248, 98~249, 99~250	26~66	岩石圈	大地水准面
EGM96	26~180	36~255	岩石圈、软流层	
IGG05B	118~230	28~54	岩石圈	
EGM2008	122~250	26~53	岩石圈	重力异常
EGM96	66~247, 67~248, 68~249, 69~250	26~98	岩石圈	
IGG05B	121~239, 122~240, 123~241	27~53	岩石圈	

4.3 GOCE 重力场模型相比 EGM2008 模型优势阶分析

目前为止,国际上公认的最好重力场模型为

可以得知,重力场模型的不同阶次所对应的垂直场源深度也不同。为了了解模型之间主要差异值的垂直场源分布,需先求出主要差异值的阶次分布,本文根据统计分析的基本原理,利用差值均方根所代表的含义设计了一种新方法,能够精确的找出 GOCE 重力场模型与其他系列模型主要差异值的阶次分布。

首先,分别计算出 EGM2008、EGM96、IGG05B 这 3 个模型与 GOCE-only(I)之间(2~250 阶)大地水准面和重力异常差值的均方根 $\sigma_{2,250}^{m_i}(\Delta N)$ 、 $\sigma_{2,250}^{m_i}(\delta\Delta g)$,然后在 2~250 阶中选用不同的最小(N_{min})、最大(N_{max})阶次,计算出 N_{min}~N_{max}之间大地水准面和重力异常差值的均方根 $\sigma_{N_{min},N_{max}}^{m_i}(\Delta N)$ 、 $\sigma_{N_{min},N_{max}}^{m_i}(\delta\Delta g)$ 。当以上变量满足以下条件时

$$\left. \begin{aligned} & \frac{\sigma_{N_{min},N_{max}}^{m_i}(\Delta N)}{\sigma_{2,250}^{m_i}(\Delta N)} \quad \text{or} \quad \frac{\sigma_{N_{min},N_{max}}^{m_i}(\delta\Delta g)}{\sigma_{2,250}^{m_i}(\delta\Delta g)} \geq 95\% \\ & 2 \leq N_{min}, N_{max} \leq 250 \\ & \Delta N = N_{max} - N_{min} = \min \\ & (i = \text{EGM2008, EGM96, IGG05B}) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

得出未知量 N_{min}和 N_{max},此时认为模型之间的主要差异值分布在 N_{min}到 N_{max}之间。最后根据式(7)计算出垂直场源深度 D_{min}和 D_{max}。计算结果(表 5)显示:3 个模型与 GOCE-only(I)模型之间主要差异值的垂直场源深度主要分布在岩石圈,只有 EGM96 与 GOCE-only(I)模型之间的大地水准面主要差异值的场源深度超过青藏地区岩石圈深度达到 255 km 的软流层。

EGM2008 模型,通过对表 3 中重力异常各阶次验证精度(标准差)的趋势进行线性化分析得出:在青藏地区 GOCE 重力场模型相比 EGM2008 的重

力异常优势主要集中在中波段约为 130~250 阶。图 4 可以看出:对整个青藏地区而言,两个模型所计算的 130~250 阶剩余重力异常的总体分布形态未出现较大差异,但在局部地区(图中长方形标注)出现了较为明显的差异,且 GOCE 重力场模型显示出较多的重力异常不连续带(图中直线标注),它们可能是区域性大断层或区域韧性剪切带^[21]。因此对于整个青藏地区,GOCE 重力场模型相比 EGM2008 模型重力异常在中波段(130~250 阶)以及局部区域精度有明显提高。

5 结 论

随着 GOCE 卫星数据不断的积累,GOCE 数据解算方法包括局部求解方法^[22]的发展,GOCE 重力梯度数据恢复的青藏高原重力场模型精度也将得到进一步改善,GOCE 重力场模型给出的分层深度重力信息,有助于对青藏地区岩石圈内部构造及动力学特性等重大问题产生新的理解和认识^[23]。

本文采用青藏地区 GPS/水准和实测重力数据,分别对 GOCE 以及其他代表性重力场模型在青藏地区进行了外部测试,得出 GOCE 重力场模型在青藏地区高程异常的精度约为 75 cm,重力异常的精度约为 $2 \times 10^{-4} \text{ m/s}^2$ 。在重力异常精度验证中引入一种新的滤波方法,精度相比传统方法提高 $5 \times 10^{-5} \sim 10 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。同时首次采用统计分析的方法精确找出 GOCE 重力场模型与其他模型之间最大差异值的阶次和垂直场源分布,结果显示:在青藏地区模型之间最大差异值在空间水平方向主要分布在喜马拉雅山脉与昆仑山脉等地形起伏较大的地区,阶次上主要集中在中波段,转化为垂直场源深度后在岩石圈。下一步工作将结合青藏地区地质、地震等资料,并利用 GOCE 重力场模型进行重力联合反演,从而将有助于对青藏地区岩石圈构造产生更加深刻的认识。

致谢:感谢德国地球科学中心(GFZ)和欧空局(ESA)提供重力场模型数据。

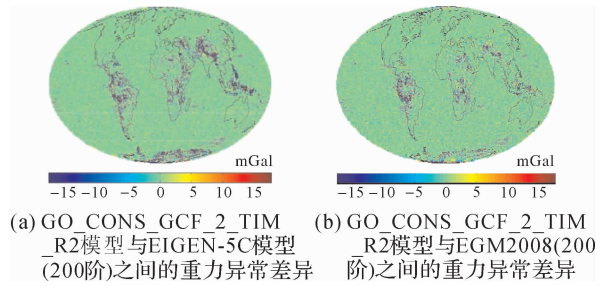
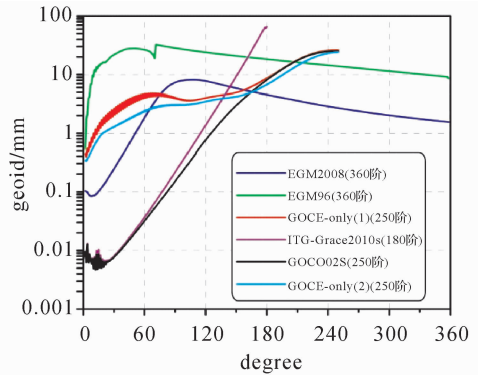
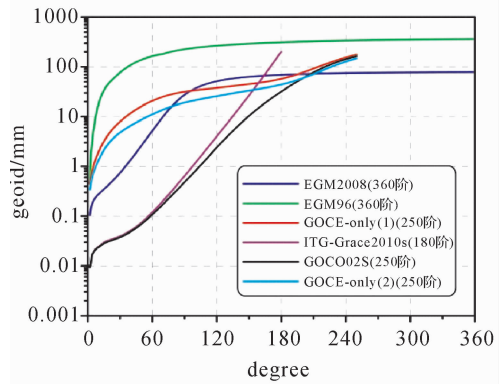


图 1 GO_CONS_GCF_2_TIM_R2 模型与 EIGEN-5C (200 阶)模型及 EGM2008(200 阶)模型之间的重力异常差异

Fig. 1 Gravity anomaly deviations (D/O 200) of the GO_CONS_GCF_2_TIM_R2 from EIGEN-5C and EGM2008(1 mGal= 10^{-5} m/s^2)



(a) 不同重力场模型的大地水准面阶次误差



(b) 不同重力场模型的大地水准面累积误差

图 2 不同重力场模型的大地水准面阶次误差与大地水准面累积误差

Fig. 2 Error degree amplitudes and error amplitudes as a function of maximum degree of different gravity field models in terms of geoid heights

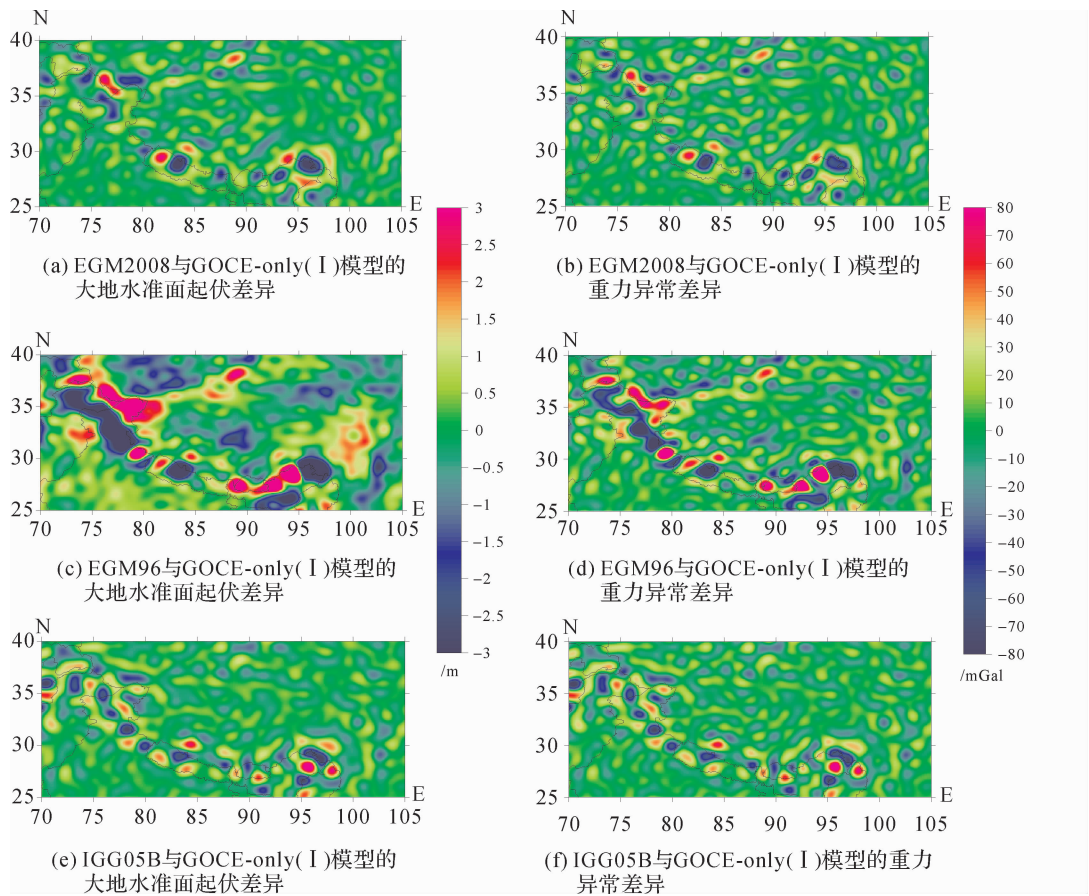


图3 EGM2008、EGM96、IGG05B模型与GOCE-only(I)模型比较的大地水准面和重力异常差异

Fig. 3 Geoid height and gravity anomaly deviations of the GOCE-only(I) from EGM2008, EGM96 and IGG05B

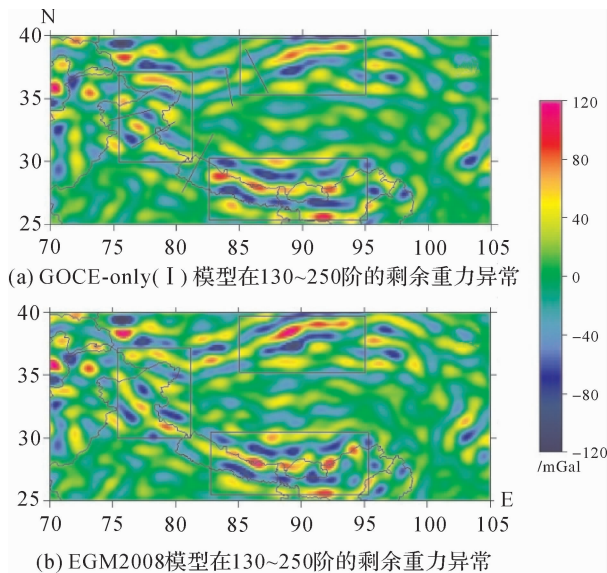


图4 GOCE-only(I) (130~250阶)模型与EGM2008 (130~250阶)模型在青藏地区的剩余重力异常

Fig. 4 Residual gravity anomaly computing by GOCE-only(I) (D/O 130~250) and EGM2008 (D/O 130~250) in Qinghai-Tibet region

参考文献:

- [1] European Space Agency. Gravity Field and Steady-state Ocean Circulation Mission [R]. Reports for Mission Selection, The Four Candidate Earth Explorer Core Missions. Noordwijk: ESA Publication Division, 1999: 9-27.
- [2] DRINKWATER M, FLOBERGHAGEN R, HAAGMANS R, et al. GOCE: ESA's First Earth Explorer Core Mission [J]. Space Science Reviews, 2003, 108(1): 419-432.
- [3] FOERSTE G, BRUINSMA S, SHAKO R, et al. EIGEN-6: A New Combined Global Gravity Field Model Including GOCE Data from the Collaboration of GFZ-Potsdam and GRGS-Toulouse [J]. Geophysical Research Abstracts, 2011, 13: 1-13.
- [4] GOIGINGER H, HOECK E, RIESER D, et al. The Combined Satellite-only Global Gravity Field Model GOCO02S [R]. Vienna: The 2011 General Assembly of the European Geosciences Union, 2011.
- [5] PAIL R, GOIGINGER H, SCHUH W D, et al. Combined Satellite Gravity Field Model GOCO01S Derived from GOCE and GRACE [J]. Geophysical Research Letters, 2010, 37(20): 203-214.
- [6] BRUINSMA S L, MARTY J C, BALMINO G, et al.

- GOCE Gravity Field Recovery by Means of the Direct Numerical Method[R]. Bergen: The ESA Living Planet Symposium, 2010.
- [7] PAIL R, GOINGER H, MAYRHOFER R, et al. Global Gravity Field Model Derived from Orbit and Gradiometry Data Applying the Time-wise Method[C]// Proceedings of ESA Living Planet Symposium. Bergen; ESA Publication Division, 2010:101-108.
- [8] MIGLIACCIO F, REGUZZONI M, GATTI A, et al. A GOCE-only Global Gravity Field Model by the Space-wise Approach[C]// Proceedings of the 4th International GOCE User Workshop. Munich; ESA Publication Division, 2011: 1-8.
- [9] PAIL R, BRUINSMA S, MIGLIACCIO F, et al. First GOCE Gravity Field Models Derived by Three Different Approaches[J]. Journal of Geodesy, 2011, 85(11): 819-843.
- [10] ZHONG Bo, LUO Zhicai, LI Jiancheng, et al. Spectral Combination Method for Recovering the Earth's Gravity Field from High-low SST and SGG Data[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2012, 41(5): 735-742. (钟波, 罗志才, 李建成, 等. 联合高低卫-卫跟踪和卫星重力梯度数据恢复地球重力场的谱组合法[J]. 测绘学报, 2012, 41(5): 735-742.)
- [11] XU Houze, WANG Yong, LU Yang, et al. The Geodesy Research of the Tibetan Plateau[M]. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 2000: 1-2. (许厚泽, 王勇, 陆洋, 等. 青藏高原的大地测量研究[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2000: 1-2.)
- [12] JIANG Weiping, ZHOU Xiaohui, LIU Jingnan, et al. Present-Day Crustal Movement and Strain Rate in the Qinghai-Tibetan Plateau from GPS Data[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2008, 37(3): 285-292. (姜卫平, 周晓慧, 刘经南, 等. 青藏高原地壳运动与应变的GPS监测研究[J]. 测绘学报. 2008, 37(3): 285-292.)
- [13] PAVLIS N K, HOLMES S A, KENYON S C, et al. An Earth Gravitational Model to Degree 2160; EGM2008[R]. Vienna; General Assembly of the European Geosciences Union, 2008: 13-14.
- [14] LEMOINE F G, KENYON S C, FACTOR J K, et al. The Development of the Joint NASA GSFC and the National Imagery and Mapping Agency (NIMA) Geopotential Model EGM96[R]. Greenbelt; NASA/TP-1998-206861, Goddard Space Flight Center, 1998.
- [15] MAYER-GÜRR, KURIENBACH T E, EICKER A. ITG-Grace2010 Gravity Field Model[EB/OL]. [2012-10-21]. <http://www.igg.uni-bonn.de/apmg/index.php?id=itg-grace2010>.
- [16] GFZ. Root Mean Square about Mean of GPS/Levelling Minus Gravity Field Model Derived Geoid Heights[EB/OL]. [2012-10-21]. <http://www.igfs.net/>.
- [17] HEISKANEN W A, MORITZ H. Physical Geodesy[M]. San Francisco: Freeman, 1967.
- [18] ZHANG Chuanyin, GUO Chunxi, CHEN Junyong, et al. EGM2008 and Its Application Analysis in Chinese Mainland[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2009, 38(4): 283-289. (章传银, 郭春喜, 陈俊勇, 等. EGM2008地球重力场模型在中国大陆适用性分析[J]. 测绘学报, 2009, 38(4): 283-289.)
- [19] ZENG Yuanwu, YANG Zhanji, ZHANG Tianji. Evaluation of EGM96, WDM94 and GPM98CR Geo-potential Models for Representing the Local Gravity Field of Shenzhen, China[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2002, 31(4): 289-291. (曾元武, 杨沾吉, 张天纪. EGM96, WDM94和GPM98CR高阶地球重力场模型表示深圳局部重力场的比较与评价[J]. 测绘学报, 2002, 31(4): 289-291.)
- [20] BOWIN C. Depth of Principal Mass Anomalies Contributing to the Earth's Geoidal Undulation and Gravity Anomalies[J]. Marine Geodesy, 1983, 7(1-4): 61-100.
- [21] YUAN Xuecheng. 3D Lithospheric Structure of Western China and Its Enlightenment on Petroleum Prospecting[J]. Geology in China, 2005, 32(1): 1-12. (袁学诚. 论中国西部岩石圈三维结构及其对寻找油气资源的启示[J]. 中国地质, 2005, 32(1): 1-12.)
- [22] GAO Chunchun, LU Yang. Study Progress in Regional Gravity Field Recovery Using Satellite Gravity Gradiometry[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2012, 32(1): 71-75. (高春春, 陆洋. 利用卫星重力梯度恢复局部重力场的研究进展[J]. 海洋测绘, 2012, 32(1): 71-75.)
- [23] FIELDING E J, MCKENZIE D. Lithospheric Flexure in the Sichuan Basin and Longmen Shan at the Eastern Edge of Tibet[J]. Geophysical Research Letters, 2012, 39(9): 93-101.

(责任编辑:丛树平)

收稿日期: 2012-11-02

修回日期: 2013-03-07

第一作者简介: 高春春(1987—),男,博士生,研究方向为卫星重力学和大地测量学。

First author: GAO Chunchun (1987—), male, PhD candidate, majors in satellite gravimetry and geodesy.

E-mail: gaochun19870111@163.com