

引文格式:党亚民,郭春喜,蒋涛,等.2020 珠峰测量与高程确定[J].测绘学报,2021,50(4):556-561. DOI:10.11947/j.AGCS.2021.20210034.
DANG Yamin, GUO Chunxi, JIANG Tao, et al. 2020 height measurement and determination of Mount Qomolangma[J]. Acta
Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, 50(4): 556-561. DOI: 10.11947/j.AGCS.2021.20210034.

2020 珠峰测量与高程确定

党亚民¹, 郭春喜², 蒋 涛¹, 张庆涛³, 陈 斌⁴, 蒋光伟²

1. 中国测绘科学研究院, 北京 100830; 2. 自然资源部大地测量数据处理中心, 陕西 西安 710054; 3. 自然资源部第一大地测量队, 陕西 西安 710054; 4. 中国地质调查局自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083

2020 height measurement and determination of Mount Qomolangma

DANG Yamin¹, GUO Chunxi², JIANG Tao¹, ZHANG Qingtao³, CHEN Bin⁴, JIANG Guangwei²

1. Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100830, China; 2. Geodetic Data Processing Centre of Ministry of Natural Resources, Xi'an 710054, China; 3. The First Geodetic Surveying Brigade of Ministry of Natural Resources, Xi'an 710054, China; 4. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resources, Beijing 100083, China

Abstract: In order to achieve the goal that China and Nepal jointly announce the height of Mount Qomolangma, China has carried out the height measurement campaign of Mount Qomolangma from 2019 to 2020, and completed the summit survey on May 27, 2020. For the first time, airborne gravity survey was conducted in the north region of Mount Qomolangma and ground gravity data at the summit was collected, and the local gravimetric quasigeoid model and the geoid undulation of the summit in the International Height Reference System (IHRs) were determined. A variety of advanced measuring equipment, especially domestic measuring instruments played a full and active role in 2020 campaign. By means of the cross validations between multiple geodetic techniques and the strict checking computations, the accuracy and reliability of the results of 2020 campaign were ensured. Finally, China and Nepal collaborated on the data processing and jointly determined that the orthometric height (altitude) of the snow surface of the summit of Mount Qomolangma is 8 848.86 m.

Key words: height measurement of Mount Qomolangma; GNSS; airborne gravity; geoid; international height reference system

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (Nos. 41974010; 42074020)

摘 要:为实现中国和尼泊尔共同宣布珠峰高程,我国于2019—2020年开展了珠峰高程测量工作,并于2020年5月27日完成峰顶测量。首次在珠峰北侧区域实施航空重力测量、开展峰顶地面重力测量,首次联合航空和地面重力等数据确定了基于国际高程参考系统(international height reference system, IHRs)的珠峰区域重力似大地水准面模型和峰顶大地水准面差距。此次珠峰测量,各种先进测量装备尤其是国产测量仪器全面担纲,通过多种技术手段相互验证和严密检核计算,确保了珠峰高程测量成果的精度和可靠性。最后,中尼双方合作开展数据处理,共同确定珠峰峰顶雪面正高(海拔高)为8 848.86 m。

关键词: 珠峰高程测量; GNSS; 航空重力; 大地水准面; 国际高程参考系统

中图分类号: P223 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-1595(2021)04-0556-06

基金项目: 国家自然科学基金(41974010; 42074020)

珠穆朗玛峰(以下简称珠峰)位于中国和尼泊尔边境,是世界最高山峰。我国自1966年以来先后对珠峰高程进行了6次测量,其中1975年和2005年两次开展大规模测量,测定了珠峰高程并正式发布^[1-6]。2015年4月,尼泊尔发生8.1级地震,珠峰高程再次引起全世界关注。尼泊尔、中国

分别于2019年、2020年开展珠峰高程测量,中尼合作确定了珠峰最新高程。本文主要介绍2020珠峰高程测量的外业观测、数据处理、检核计算和高程确定等工作。

1 2020 珠峰高程测量外业观测

1.1 坐标控制测量

以GNSS基准站作为首级坐标控制,选取西藏、青海和新疆范围内稳定的105个国家GNSS基准站(含2个IGS站)、2个临时GNSS基准站(位于大本营、曲当乡),共计107个作为珠峰地区GNSS基准站网。在珠峰外业观测阶段,重点加强对上述GNSS基准站的维护和保障,确保数据接收情况良好,以供数据处理使用。

布设由61个点组成的珠峰局部GNSS控制网,每点开展GNSS观测1~2个时段,时段长度8~14 h,采样间隔10 s。61个GNSS控制点包含了6个交会观测点(大本营、中绒、Ⅲ7、西绒、东绒2和东绒3)和峰顶GNSS联测网中的地面GNSS测站。这61个点同时也是水准点,结合水准测量获取61个点的GNSS水准实测高程异常,可用于珠峰地区重力似大地水准面模型检核。

1.2 高程控制测量

为将1985国家高程基准精确传递至珠峰地区,从国家一等水准点“日喀则基岩点北”起测,通过一、二、三等水准测量获取沿线各个测站的高程,最终传递至6个交会观测点(大本营、中绒、Ⅲ7、西绒、东绒2和东绒3)。对于水准测量确有困难的点位,采用测距高程导线方法进行高程传递。一等水准路线长度520 km,二等水准路线长度253.1 km,三等水准路线长度8.6 km,测距高程导线长度18.5 km。

1.3 重力测量

1.3.1 航空重力测量

精确测定珠峰高程需要建立珠峰地区的高精度似大地水准面模型,进而需要密集、均匀分布的高精度重力数据。珠峰地区平均海拔高度在5000 m以上,地形地貌极端复杂,大部分区域无法开展地面重力测量,重力数据稀少,且分布很不均匀。为解决该区域地面重力数据空白问题,此次珠峰测量在珠峰地区开展了航空重力测量,并取得成功。

航空重力测量使用航空地质一号(空中国王350ER型飞机),同机搭载GT-2A型航空重力仪

和DGA-01型国产航空重力仪,平均飞行速度441.7 km/h,平均飞行高度10 249 m(大地高)。其中,东西向数据测线39条,南北向交叉测线9条,共有264个交叉点,测线间距5 km,在珠峰邻近区域测线间距加密为2.5 km,测线总长度5 635.2 km,覆盖面积1.27万km²,数据采样率2 Hz,共获取83 803个数据点。选取同架次、同测线观测数据进行比较,GT-2A型和DGA-01型航空重力仪的内符合精度达0.34 mGal(1 Gal=1 cm/s²),具有良好的一致性,最终采用GT-2A型的数据。经100 s卡尔曼测线滤波处理后,测线网交叉点差值RMS为1.1 mGal。

1.3.2 地面重力测量

在珠峰邻近区域拓展了4条新路线,结合水准路线和登山路线,共新测了210点地面重力数据(见图1)。海拔6500 m以上登山路线的3个重力点(含峰顶)采用国产Z400型相对重力仪进行观测,未构成附和或闭合观测路线。其他重力点采用CG-6型相对重力仪进行观测,构成附和或闭合路线,重力值精度优于±39.5 μGal。

1.4 峰顶测量

北京时间2020年5月27日11时至13时22分,中国测量登山队登顶珠峰并完成峰顶测量,包括峰顶GNSS测量、交会测量、冰雪探测雷达测量和重力测量。

1.4.1 峰顶GNSS测量与冰雪探测雷达测量

峰顶GNSS测量采用国产(CHCNAV P5)与进口(TRIMBLE ALLOY)两种GNSS接收机同时观测,共用一个GNSS天线,固定于觇标顶端,均接收到GPS和北斗卫星数据,国产GNSS接收机有效数据时间长度为40 min 53 s,进口GNSS接收机有效数据时间长度为41 min 39 s,采样间隔0.05 s。同时,峰顶GNSS点与峰下7个地面GNSS测站、1个临时GNSS基准站组成峰顶GNSS联测网,进行同步静态观测,7个地面GNSS测站观测时间不少于8 h。

利用集成GNSS设备的国产冰雪探测雷达仪器(GNSS+GPR)进行峰顶冰雪层厚度探测,采样率为40 Hz,共获取有效数据11 326个观测值。

1.4.2 峰顶交会测量

峰顶成功竖立测量觇标后,利用国产长测程全站仪,分别从大本营、中绒、Ⅲ7、东绒2、东绒3和西绒6个交会点对峰顶觇标进行交会观测,测

量水平角、垂直角和距离,最长斜距达 18.3 km (大本营—峰顶)。峰顶交会测量数据主要用于对峰顶 GNSS 测量结果进行独立检核。

1.4.3 峰顶重力测量

利用国产 Z400 型相对重力仪,在世界上首次获取了珠峰峰顶重力观测值。需要指出的是,2005 年珠峰高程测量时重力测量推进到海拔高度 7790 m,通过推算得到峰顶重力值^[4-5]。此次获取的峰顶实测重力值,有助于提高峰顶高程异常至大地水准面差距的转换计算精度^[7]。

2 2020 珠峰高程测量数据处理与检核计算

2.1 基于国际高程参考系统的珠峰区域重力似大地水准面模型

中国 1985 国家高程基准以黄海多年平均海平面作为高程起算面,尼泊尔法定高程则从孟加拉湾平均海平面起算。为解决高程基准不一致的问题,双方商定:根据国际大地测量协会 2015 年、2019 年在捷克布拉格、加拿大蒙特利尔发布的关于国际高程参考系统(international height reference system, IHRS)定义和实现的官方决议^[8-9],采用 IHRS 定义的重力位值 W_0 ^[10-11] 和 GRS80(geodetic reference system 1980)参考椭球^[12],建立珠峰区域重力似大地水准面模型,计算得到珠峰峰顶的大地水准面差距,作为 IHRS 中珠峰正高(海拔高)的起算基准。

基于 IHRS 的峰顶大地水准面差距 N 为

$$N = \zeta + \Delta + N_0. \tag{1}$$

式中, ζ 为峰顶高程异常,由重力似大地水准面模型内插计算; Δ 为高程异常转换为大地水准面差距的改正项,由峰顶实测重力值和 DEM 数据计算; N_0 为大地水准面差距零阶项,采用下式计算^[13-14]

$$N_0 = \frac{GM - GM_0}{r \cdot \gamma} - \frac{W_0 - U_0}{\gamma} \tag{2}$$

式中, $GM = 3.986\,004\,415 \times 10^{14} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$ 为地心引力常数; $GM_0 = 3.986\,005 \times 10^{14} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$ 为 GRS80 参考椭球的地心引力常数; $W_0 = 62\,636\,853.4 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ 为 IHRS 定义的重力位值; $U_0 = 62\,636\,860.850 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ 为 GRS80 参考椭球的正常重力位值; r 为大地水准面上相应点的地心距离; γ 为椭球面上相应点的正常重力值。

建立珠峰区域重力似大地水准面模型使用了 EIGEN-6C4 地球重力场模型^[15]、8232 点地面重

力、83 803 点航空重力和 $3'' \times 3''$ DEM 数据^[16],采用了 3 种计算方案。方案 1 是仅利用地面重力异常数据,利用基于移去-计算-恢复的 Molodensky 方法计算重力似大地水准面^[17-21]。方案 2 是将航空重力异常数据延拓至地面,与地面重力异常数据融合后,采用基于移去-计算-恢复的 Molodensky 方法计算重力似大地水准面^[17-21]。方案 3 是利用谱组合方法联合航空重力扰动和地面重力异常数据一步计算重力似大地水准面^[22-25]。3 种方案计算的重力似大地水准面与 61 点 GNSS 水准高程异常进行比较,差值的标准差见表 1,代表了重力似大地水准面的外符合精度。加入航空重力数据后,珠峰区域重力似大地水准面精度分别提升了 38.5% 和 51.3%。图 2 为联合航空和地面重力数据构建的珠峰区域重力似大地水准面模型。

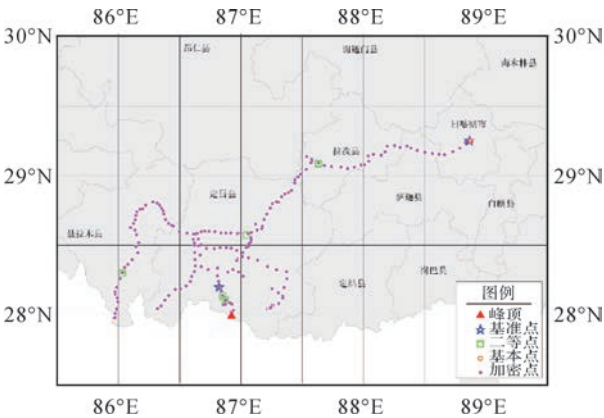


图 1 珠峰地区新测地面重力数据分布

Fig.1 Distribution of new ground gravity data in the area of Mount Qomolangma

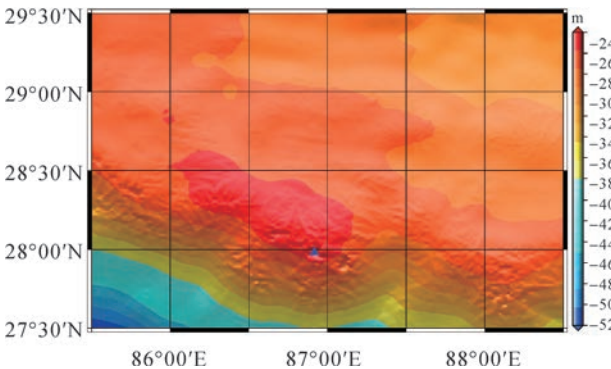


图 2 珠峰区域重力似大地水准面模型(蓝色三角形表示珠峰)

Fig. 2 Gravimetric quasigeoid model in the area of Mount Qomolangma

表 1 重力似大地水准面外符合精度

Tab.1 External accord accuracy of gravimetric quasigeoid

m	
计算方案	与 GNSS 水准差值的标准差
方案 1	0.078
方案 2	0.048
方案 3	0.038

方案 2、方案 3 采用相同数据、不同方法,互为独立检核计算,两种方案所得峰顶大地水准面差距的差异为 3.6 cm。GNSS 水准检核和不同方案的比较验证了峰顶大地水准面差距结果的精度和可靠性。

2.2 峰顶 GNSS 联测网与交会测量

GNSS 静态数据处理采用 GAMIT/GLOBK 软件 10.7 版本,同时利用 BERNese 软件进行检核计算。从珠峰地区 GNSS 基准站网中精选 24 个 GNSS 基准站作为起算点,完成珠峰局部 GNSS 控制网的基线解算与网平差计算。珠峰局部 GNSS 控制网平均精度在平面方向为 0.9 mm,高程方向为 3.5 mm。

对峰顶 GNSS 点、7 个地面 GNSS 测站和 1 个临时 GNSS 基准站(大本营)组成峰顶联测网进行解算(图 3),在 ITRF2014 参考框架、平均瞬时历元(2020.404),共获取 4 套峰顶点 GNSS 坐标结果。表 2 为 4 套峰顶点 GNSS 坐标的精度统计,国产设备与进口设备结果精度相当,GPS 结果与北斗结果在 高程方向上精度相当,GPS 结果在水平方向上略优于北斗结果。表 2 中,国产与进口设备所测峰顶点 GNSS 坐标的精度在 E 方向均大于 2 cm,比 U 方向精度要差,分析其原因主要是受珠峰地形限制,峰顶联测网地面 GNSS 测站都位于珠峰峰顶西北方向,珠峰南部和东部无地面 GNSS 测站(见图 3),GNSS 网形结构限制了峰顶 GNSS 坐标水平方向的精度。

表 2 峰顶点 GNSS 坐标精度

Tab.2 GNSS coordinate precision of the summit

mm				
GNSS 设备	卫星系统	N 方向	E 方向	U 方向
国产	GPS	9.5	21.6	19.4
	北斗	11.8	29.1	18.1
进口	GPS	8.9	20.1	18.2
	北斗	12.6	28.4	19.2

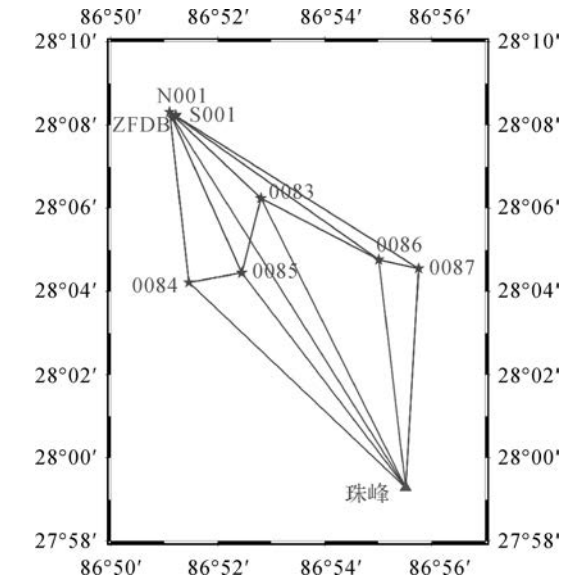


图 3 峰顶 GNSS 联测网

Fig.3 Summit GNSS observation network

表 3 为国产设备与进口设备数据所得峰顶点 GNSS 坐标的差异统计,GPS 坐标差异和北斗坐标差异均小于 1 cm,验证了国产 GNSS 设备和进口 GNSS 设备的结果一致性。最后,融合 GPS 和北斗数据得到最终的峰顶点 GNSS 坐标,平面坐标精度为±13.2 mm,大地高精度为±9.4 mm。

表 3 国产设备与进口设备数据所得峰顶点 GNSS 坐标的差异

Tab.3 Differences between GNSS coordinates of the summit obtained by domestic and imported equipment

mm			
卫星系统	N 方向	E 方向	U 方向
GPS	1.5	1.1	1.5
北斗	3.8	9.3	-7.6

利用从 6 个交会点对峰顶觇标进行交会观测获取的水平角、垂直角和距离以及探空气球气象观测数据,计算大气折光系数,通过边角网平差计算峰顶点的大地纬度和经度,利用三角高程测量方法确定大地高,获取的峰顶点平面位置精度为±0.051 m,大地高精度为±0.042 m。

峰顶 GNSS 联测和交会测量是两种相互独立的观测技术,将 GNSS 联测和交会测量确定的峰顶点坐标进行比较,平面位置差异为 0.042 m,大地高差异为 0.026 m,这充分说明了两种技术所得峰顶点坐标的一致性、可靠性和精度。

2.3 珠峰高程确定

中尼两国专家对峰顶 GNSS 联测网、重力似大

地水准面模型和峰顶大地水准面差距等数据处理结果进行细致比对, 双方数据和结果一致性较好。中尼双方利用各自的观测数据, 首次合作确定了基于 IHRs 的珠峰区域重力似大地水准面模型和峰顶大地水准面差距, 联合处理珠峰峰顶 GNSS 数据并获取峰顶雪面大地高, 最终共同确定基于 IHRs 的珠峰峰顶雪面正高为 8 848.86 m, 测量精度 ± 0.06 m。

3 结 论

2020 珠峰高程测量, 综合运用 GNSS、水准、光电测距、雪深雷达、地面和航空重力等多种大地测量技术, 中国和尼泊尔合作确定了基于 IHRs 的珠峰峰顶雪面正高(海拔高) 8 848.86 m \pm 0.06 m。

利用国产相对重力仪完成峰顶地面重力测量, 采集了人类历史上第一个珠峰峰顶重力测量结果。成功实施珠峰地区航空重力测量, 联合 EIGEN-6C4 地球重力场模型、航空和地面重力及 DEM 数据确定了基于 IHRs 的珠峰区域重力似大地水准面模型和珠峰峰顶大地水准面差距。航空重力和峰顶地面重力数据显著提升了重力似大地水准面精度, 达 ± 4.8 cm, 其中航空重力数据使得模型精度提升了 38.5%。

国产 GNSS 设备和北斗导航卫星系统首次应用于珠峰峰顶测量, GPS 与北斗数据获取的峰顶雪面大地高精度相当, 融合 GPS 与北斗数据确定的峰顶雪面大地高精度达 ± 0.93 cm。利用国产长测程全站仪开展珠峰峰顶交会测量, 对峰顶 GNSS 测量结果进行独立检核, 两种技术确定的峰顶雪面大地高仅相差 2.6 cm。国产与进口 GNSS 设备、GPS 与北斗以及峰顶 GNSS 联测与交会测量的组合确保了珠峰峰顶雪面大地坐标的精度和可靠性。

此外, 还开展了珠峰地区航空光学和激光雷达遥感测量、实景三维模型构建和冰川变化监测等工作, 获取的丰富观测数据成果, 将为珠峰地区的生态环境保护修复、自然资源监测管理和地质调查研究等领域提供基础资料。

致谢: 自然资源部会同外交部、国家体育总局和西藏自治区政府组织了 2020 珠峰高程测量工作, 实施单位包括中国测绘科学研究院、陕西测绘地理信息局、中国自然资源航空物探遥感中心和中国登山协会等单位。数十位院士、专家在方案

设计、工程实施和数据处理阶段积极出谋划策。特此向为 2020 珠峰高程测量工作做出贡献的专家学者、测绘队员和登山队员表示衷心的感谢。

参考文献:

[1] 陈俊勇. 珠穆朗玛峰高程计算[J]. 测绘通报, 1975(4): 19-27.
CHEN Junyong. Height determination for Qomolangma Peak[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 1975(4): 19-27.

[2] 朱亮. 珠穆朗玛峰的高程测定[J]. 中国科学, 1976, 19(2): 74-83.
ZHU Liang. Height determination of Qomolangma Peak[J]. Science in China, 1976, 19(2): 74-83.

[3] 陈俊勇, 庞尚益, 张骥, 等. 对我国 35 年来珠峰高程测定成果的思考[J]. 测绘学报, 2001, 30(1): 1-5. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1595.2001.01.001.
CHEN Junyong, PANG Shangyi, ZHANG Ji, et al. The height determination of Qomolangma Peak in China: review and analysis[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2001, 30(1): 1-5. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1595.2001.01.001.

[4] 陈俊勇, 张燕平, 岳建利, 等. 2005 珠峰高程测定[J]. 测绘学报, 2006, 35(1): 1-3. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1595.2006.01.001.
CHEN Junyong, ZHANG Yanping, YUE Jianli, et al. 2005 height determination of Qomolangma Peak[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2006, 35(1): 1-3. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1595.2006.01.001.

[5] 陈俊勇, 岳建利, 郭春喜, 等. 2005 珠峰高程测定的技术进展[J]. 中国科学 D 辑(地球科学), 2006, 36(3): 280-286.
CHEN Junyong, YUE Jianli, GUO Chunxi, et al. Technical progress of 2005 height determination of Qomolangma Peak[J]. Science in China Ser. D (Earth Science), 2006, 36(3): 280-286.

[6] 党亚民, 程传录, 陈俊勇, 等. 2005 珠峰测高 GPS 测量及其数据处理[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2006, 31(4): 297-300, 320.
DANG Yamin, CHENG Chuanlu, CHEN Junyong, et al. GPS data processing of the 2005 Qomolangma height surveying[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2006, 31(4): 297-300, 320.

[7] FLURY J, RUMMEL R. On the geoid-quasigeoid separation in mountain areas[J]. Journal of Geodesy, 2009, 83(9): 829-847.

[8] International Association of Geodesy. IAG Resolutions Adopted by the IAG Council at the XXVIth IUGG General Assembly[EB/OL]. (2015-06-22). <https://office.iag-aig.org/iag-and-iugg-resolutions>.

[9] International Association of Geodesy. IAG Resolutions

- Adopted by the IAG Council at the XXVIIth IUGG General Assembly [EB/OL]. [2019-07-08]. <https://office.iag-aig.org/iag-and-iugg-resolutions>.
- [10] IHDE J, SÁNCHEZ L, BARZAGHI R, et al. Definition and proposed realization of the international height reference system (IHRs)[J]. *Surveys in Geophysics*, 2017, 38(3): 549-570.
- [11] SÁNCHEZ L, SIDERIS M G. Vertical datum unification for the international height reference system (IHRs)[J]. *Geophysical Journal International*, 2017, 209(2): 570-586.
- [12] MORITZ H. Geodetic reference system 1980[J]. *Journal of Geodesy*, 2000, 74(1): 128-133.
- [13] RAPP R H. A Fortran program for the computation of gravimetric quantities from high degree spherical harmonic expansions [R]. Columbus: The Ohio State University, 1982.
- [14] SÁNCHEZ L, ÅGREN J, HUANG J, et al. Basic agreements for the computation of station potential values as IHRs coordinates, geoid undulations and height anomalies within the Colorado 1 cm geoid experiment, Version 0.5 Munich: Technical University of Munich[R]. 2018.
- [15] FÖRSTE C, BRUINSMA S, ABRIKOSOV O, et al. EIGEN-6C4: the latest combined global gravity field model including GOCE data up to degree and order 2190 of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse[R]. Potsdam, Germany: GFZ Data Services, 2014.
- [16] FARR T G, ROSEN P, CARO E, et al. The shuttle radar topography mission[J]. *Reviews of Geophysics*, 2007, 45(2): RG2004.
- [17] HEISKANEN W A, MORITZ H. *Physical geodesy*[M]. San Francisco: Springer, 1967.
- [18] MORITZ H. *Advanced physical geodesy*[M]. Karlsruhe: Herbert Wichmann Verlag, 1980.
- [19] HOFMANN-WELLENHOL B, MORITZ H. *Physical geodesy*[M]. New York: Springer, 2005.
- [20] 李建成, 陈俊勇, 宁津生, 等. 地球重力场逼近理论与中国 2000 似大地水准面的确定[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003.
- LI Jiancheng, CHEN Junyong, NING Jinsheng, et al. *Theory of Earth gravity field approximation and China 2000 quasigeoid determination*[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2003.
- [21] 郭春喜, 宁津生, 陈俊勇, 等. 珠峰地区似大地水准面精化与珠峰顶正高的确定[J]. *地球物理学报*, 2008, 51(1): 101-107.
- GUO Chunxi, NING Jinsheng, CHEN Junyong, et al. Improvement of regional quasi-geoid in Qomolangma and determination of orthometric elevation[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51(1): 101-107.
- [22] FORSBERG R. A study of terrain reductions, density anomalies and geophysical inversion methods in gravity field modelling [R]. Columbus: The Ohio State University, 1984.
- [23] JIANG Tao, WANG Yanming. On the spectral combination of satellite gravity model, terrestrial and airborne gravity data for local gravimetric geoid computation[J]. *Journal of Geodesy*, 2016, 90(12): 1405-1418.
- [24] JIANG Tao. On the contribution of airborne gravity data to gravimetric quasigeoid modelling: a case study over Mu Us area, China [J]. *Geophysical Journal International*, 2018, 215(2): 1308-1321.
- [25] JIANG Tao, DANG Yamin, ZHANG Chuanyin. Gravimetric geoid modeling from the combination of satellite gravity model, terrestrial and airborne gravity data: a case study in the mountainous area, Colorado[J]. *Earth, Planets and Space*, 2020, 72(1): 189.

(责任编辑:张燕燕)

收稿日期: 2021-01-15

修回日期: 2021-02-08

第一作者简介: 党亚民(1965—),男,博士,研究员,研究方向为大地测量基准与卫星精密定位。

First author: DANG Yamin (1965—), male, PhD, research fellow, majors in geodetic datum and satellite precise positioning.

E-mail: dangym@casm.ac.cn

通信作者: 蒋涛

Corresponding author: JIANG Tao

E-mail: jiangtao@casm.ac.cn