CQG2000似大地水准面模型在青藏高原地区的精度检验及其对区域重力调查工作的意义

耿　涛[1]　刘宽厚[1]　邸志众[2]　李　钢[2]

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心，陕西西安　710054;　2. 中国地质调查局发展研究中心, 北京　100083)

摘　要：区域重力调查中，测点正常高的精度直接影响重力测量成果的精度。利用CQG2000似大地水准面模型对GPS测得的大地高程进行改算，可得到较高精度的正常高成果。然而，CQG2000似大地水准面模型在不同地区的精度和分辨率是不同的，在青藏高原地区精度最差。通过对CQG2000似大地水准面模型在青藏高原地区精度的实地检验，证实其在该地区的精度可以满足1：20万区域重力调查工作中求取测点正常高的精度需要。通过上述实验，总结出用CQG2000模型提高区域重力调查中GPS高程测量精度的方法，对区域重力调查工作有重要意义。

关键词：似大地水准面模型；青藏高原；GPS测量；精度；检验

中图分类号：　　**文献标识码**：　　**文章编号**：

1．序言

在重力勘探工作中，高程测量是非常重要的一环。高程测量的精度直接影响重力测量成果的精度。

新颁布的《区域重力调查规范（DZ/T0082-2006）》提高了重力测量精度的要求。如将山区地形条件下，1：20 万重力测量的布格重力异常总精度由原规范（《区域重力调查规范（DZ/T0082-93）》）中规定的$\pm 1.0\times 10^{-5}\ m/s^2$ 提高到了$\pm 0.5\times 10^{-5} m/s^2$ ，相应的测点平面位置均方误差由原规范规定的±100 m 提高到±10 m，高程测量均方误差由原规范规定的±4.0 m 提高到±1.6 m。

在《区域重力调查规范（DZ/T0082-2006）》颁布以前，在部系统内重力勘探高程测量一直采用上世纪九十年代初原地矿部第二综合物探大队编写的《物化探

基金项目：《青海南部雁石坪地区 1:20 万区域重力调查 GPS 控制网测量》（项目编号：1212010710317）项目和《青海格尔木—雁石坪一带 1:20 万区域重力调查基点网和 GPS 控制网联测》（项目编号：1212010818009）项目

作者简介：耿涛(1969 -)，男，高级工程师。毕业于成都地质学院应用地球物理系。

GPS 测量规程》中提供的方法。这是一种近似的计算方法，即以 GPS 测量取得的 WGS84 大地高（椭球高程）H_{84} 经控制点处的高程异常改正后代替正常高（水准高程）H_r（即认为水准面是一个水平面）。然而，在高山区高程异常（水准高程与大地高程的差异）变化较大的地区，两点之间的高程异常之差最大可达到 0. 04 S （S 以 Km 为单位，在距离为 1 Km 时高程异常之差最大 4 cm）。若测量距离达 40 Km，则两点高程异常之差最大可能达到 1.6 m。因此《物化探 GPS 测量规程》中提供的高程测量方法已经很难满足《区域重力调查规范（DZ/T0082-2006）》对高程测量精度的要求。提高区域重力调查中高程测量的精度，就必须考虑高程异常改正问题。

为了解决高程异常改正问题，在 2006 年开始实施的中国地质调查局 2005 年地质大调查工作项目“青海三江北段重要成矿带 1 ：20 万区域重力调查”项目时，首次引入了 CQG2000 似大地水准面模型对 GPS 测得的大地高进行改算。

CQG2000 似大地水准面模型是以陈俊勇院士为首的课题组经过几年研究于 2001 年实现的，是我国新一代分米级精度大地水准面模型。通过用中国地壳运动观测网络的 73 个 GPS 水准点进行独立检核，表明其精度在东部（东经 102° 以东）优于±0.3 m，西部优于±0.4 m（东经 102° 以西，北纬 36° 以北）和±0.6 m （东经 102° 以西，北纬 36° 以南），整体精度达到分米级，分辨率东部为 15′ ×15′ ，西部为 30′ ×30′ ，且首次覆盖了我国大陆和海岸线以外 400 Km 邻海[1]。

关于利用 CQG2000 求解高程异常的技术方法及在区域重力调查工作中的应用，邸志众等已经做过总结[2]、[3]。利用 CQG2000 模型进行高程异常改正，现阶段 1：20 万区域重力预期的测点高程总精度为：

$$M_h = \pm \sqrt{M_{BAS}^2 + M_{GPS}^2 + M_{CQG}^2}$$

M_{BAS} ： GPS 控制网的大地高程测量精度，一般不超过±0.20m（典型物探控制网精度指标）；

M_{GPS} ：测点 GPS 大地高程测量精度，若边长在 40Km 以内，测量误差一般不超过±0.50m（经验值）；

M_{CQG} ： CQG2000 模型误差，在青藏高原地区的精度指标是±0.60m（北纬

36°以南）和±0.40m（北纬 36°以北）。

在上述情况下，高程总精度 M_h 可达到±0.81m（北纬 36°以南）和±0.67m（北纬 36°以北），理论上是《区域重力调查规范（DZ/T0082-2006）》中 1：20 万区域重力调查测点高程中误差要求的 1/2 左右。

然而，上述精度只是预期精度，从上述公式中可以看出，采用合理的技术方法，M_{BAS} 和 M_{GPS} 是可控的，因此对重力测点高程实际总精度影响最大的因素是 CQG2000 模型的实际精度。

由于地形条件的限制，我国地面重力观测数据的密度和分布相当不均匀，致使 CQG2000 似大地水准面模型的精度在全国范围内是不一致的。西部地区由于重力观测数据匮乏，部分地区还是空白区，因此其精度较低，青藏高原地区 CQG2000 似大地水准面模型的精度是最低的。

为了确定在青藏高原地区开展 1：20 万区域重力调查工作重力测点高程测量的实际精度，有必要对 CQG2000 似大地水准面模型在青藏高原地区的实际精度进行检验。基于这一需要，我们依托《青海南部雁石坪地区 1:20 万区域重力调查 GPS 控制网测量》（2007 年）项目和《青海格尔木—雁石坪一带 1:20 万区域重力调查基点网和 GPS 控制网联测》（2008 年）项目开展了这一工作。

2．检验区域的选择

要对 CQG2000 似大地水准面模型在青藏高原地区的实际精度进行检验，首先要选择具有代表性的检验区域。

根据青海省高程异常图[4]（图 1）看，昆仑山南北两侧高程异常差异很大，是整个青藏高原高程异常变化最大的地区之一。如果 CQG2000 似大地水准面模型在这一地区能达到精度，那么其在青藏高原其它地区精度应该是可信的。

据此，结合前述两个项目实施的具体地区，2007 年检验区域选在昆仑山以南可可西里地区，具体位置为国道 109 线二道沟兵站以南的八十四道班至通天河沿的九十三道班之间，经纬度约为东经 92°20′～92°45′，北纬 33°50′～34°30′。这一地区 CQG2000 似大地水准面模型给定的精度是 0.6m。2008 年检验区域选在昆仑山以北地区，具体位置为国道 109 线格尔木至西大滩之间和格尔木至大格勒农场之间，经纬度约为东经 94°20′～96°00′，北纬 35°50′～

36°30′。这一地区 CQG2000 似大地水准面模型给定的精度基本是±0.4m。

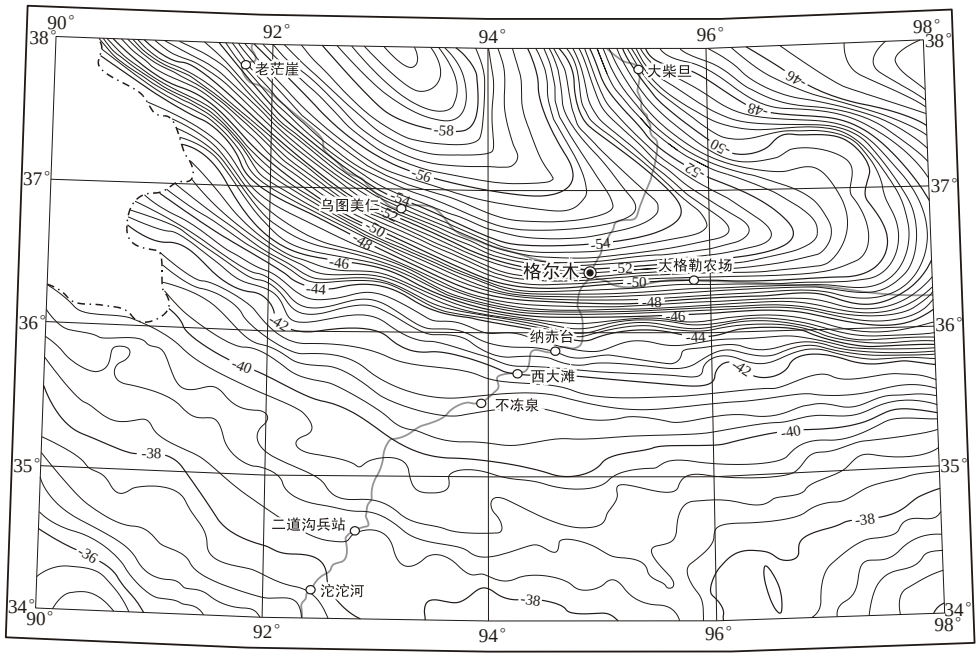


图 1　青海省高程异常图（局部）

Fig.1 Local height anomaly in Qinghai province

3．检验方法的确定

检测方法是用已知高程点来检测 CQG2000 似大地水准面模型的实际内插精度。最初的设想是，在已知的水准点上通过 GPS 静态测量求取其精确的 WGS84 大地高 H_{84}，然后利用 CQG2000 似大地水准面模型内差转换为正常高 H_r，并通过其与实际水准高程的对比，来判断 CQG2000 似大地水准面模型内差转换在检验区域内的实际精度。

然而，由于选定的检验区域内水准点很少，且原有的水准点绝大部分也已被破坏，因此，实际工作中，是通过施测水准路线确定检验点的水准高程的。

3.1　检验点正常高（水准高程）的确定

2007 年检验工作中，使用 1 个水准点，用徕卡 2″级全站仪红外高程导线施测等外水准点 29 个，水准点间距在 1~5Km 之间。采用了高程导线单程双测法，观测要求严格按《工程测量规范》执行。用红外高程联测时，对垂直角观测为中丝一测回，垂直角指标差较差≤15″，并进行对向观测，当对向观测高差≤$0.1\sqrt{D}$（D 以千米为单位）高差取其平均值。

2008 年检验工作中，使用 7 个水准点，用拓普康 AT-G2 水准仪进行水准联测，施测等外水准点 22 个，水准点间距在 0.9~2Km 之间。采用了水准导线闭合路线和附合路线法，观测要求严格按《工程测量规范》执行。单测回观测闭合差≤$30\sqrt{D}$（D 以千米为单位）。

3.2 检验点大地高（椭球高程）的确定

使用 TRIMBLE5700、5800 型双频 GPS 接收机（接收机标称精度为 5mm+0.5ppm），采用双固定站推算模式在每个检验点上进行静态测量，固定站布设在水准路线的两端，GPS 观测的技术要求见表 1，天线高度进行两次量测（测前、测后），当较差≤3mm 时，取中数输入仪器；气象元素改正用仪器设置的标准模型 Hopfeild 模型进行。采用支导线方式解算每个检验点的坐标和大地高（椭球高程）。

GPS 观测技术要求　　表 1

卫星高度角	卫星总数	时段中任一卫星有效观测时段	观测时段	时段长度	数据采集间隔	PDOP 值
≥15°	≥4	≥15min	1	≥60min	15s	≤6

3.3 检验点 CQG2000 模型转换的正常高（水准高程）的确定

利用由国家基础地理信息中心提供的 CQG2000 模型数据，通过模型内插求得每个检验点的高程异常ξ，然后利用下式求出每个检验点的正常高（水准高程）。

$$H_r = H_{84} - \xi$$

4. 检验点水准高程测量精度和 GPS 测量精度

4.1 2007 年检验点水准高程测量精度和 GPS 测量精度

2007 年电磁波测距高程导线的起算点为国家 II 等水准点，用高程导线方法测得检查点 J01～J29 的等外水准高程。

每个检验点上的 GPS 观测基线解残差（RMS）最大值为 0.015m，基线测量

全部合格。解算的检验点 WGS84 坐标及椭球高程精度如下：

纵轴误差：最大为 0.116m（J21），最小为 0.055m，均方误差为±0.076m；

横轴误差：最大为 0.120m（J21），最小为 0.055m，均方误差为±0.079m；

高度误差：最大为 0.271m（J21），最小为 0.073m，均方误差为±0.125m。

4. 2　2008 年检验点水准高程测量精度和 GPS 测量精度

2008 年水准导线的起算点为 7 个国家 I 等水准点，用等外水准联测出 JC01～JC22 的水准高程。五段水准路线测量闭合差限差最大为±0.131m。

每个检验点上的 GPS 观测基线解残差（RMS）最大值为 0.020m，基线测量全部合格。解算的检验点 WGS84 坐标及椭球高程精度如下：

纵轴误差：最大为 0.113m（JC01），最小为 0.023m，均方误差为±0.056m；

横轴误差：最大为 0.098m（SZ-1D6），最小为 0.022m，均方误差为±0.051m；

高度误差：最大为 0.495m（JC10），最小为 0.051m，均方误差为±0.286m。

5　检验点 CQG2000 转换水准高程和实测水准高程对比

5.1　2007 年检验点 CQG2000 转换正常高和实测水准高程对比结果

2007 年实测的 30 个检验点的 WGS84 大地高（椭球高程）经由 CQG2000 似大地水准面模型转换后得到的正常高与其实际的水准高程（1 个已知，29 个电磁波测距高程导线实测）对比，其结果见表 2。

2007 年检验点 CQG2000 转换水准高程和实测水准高程对比结果　　表 2

检验点	大地高	正常高（CQG2000）	高程异常	正常高（实测）	较差
SZ-2D	xxxx.428	xxxx.635	-xx.207	xxxx.622	0.013
J01	4564.764	4601.971	-37.207	4601.852	0.119
J02	4568.933	4606.145	-37.212	4606.051	0.094
J03	4579.440	4616.660	-37.220	4616.666	-0.006
J04	4593.694	4630.944	-37.250	4630.925	0.019
J05	4612.183	4649.472	-37.289	4649.413	0.059
J06	4627.407	4664.735	-37.328	4664.849	-0.114
J07	4670.947	4708.349	-37.402	4708.498	-0.149
J08	4720.681	4758.129	-37.448	4758.286	-0.157
J09	4731.119	4768.588	-37.469	4768.613	-0.025
J10	4713.791	4751.265	-37.474	4751.408	-0.143

检验点	大地高	正常高（CQG2000）	高程异常	正常高（实测）	较差
J11	4699.510	4736.987	-37.477	4737.182	-0.195
J12	4656.677	4694.156	-37.479	4694.398	-0.242
J13	4632.014	4669.493	-37.479	4669.713	-0.220
J14	4597.344	4634.827	-37.483	4635.132	-0.305
J15	4572.388	4609.883	-37.495	4610.187	-0.304
J16	4550.952	4588.480	-37.528	4588.785	-0.305
J17	4520.711	4558.310	-37.599	4558.419	-0.109
J18	4508.659	4546.406	-37.747	4546.461	-0.055
J19	4529.379	4567.222	-37.843	4567.220	0.002
J20	4532.408	4570.403	-37.995	4570.300	0.103
J21	4544.888	4582.954	-38.066	4582.846	0.108
J22	4549.803	4587.909	-38.106	4587.802	0.107
J23	4520.655	4558.815	-38.160	4558.695	0.120
J24	4519.177	4557.369	-38.192	4557.262	0.107
J25	4538.995	4577.204	-38.209	4576.990	0.214
J26	4556.727	4594.943	-38.216	4594.791	0.152
J27	4578.273	4616.492	-38.219	4616.395	0.097
J28	4591.496	4629.717	-38.221	4629.584	0.133
J29	4554.885	4592.092	-37.207	4592.096	-0.004

5.2　2008 年检验点 CQG2000 转换正常高和实测水准高程对比结果

2008 年实测的 29 个检验点的 WGS84 大地高（椭球高程）经由 CQG2000 似大地水准面模型转换后得到的正常高（水准高程）与其实际的水准高程（7 个已知，22 个等外水准联测）对比，其结果见表 3。

2008 年检验点 CQG2000 转换水准高程和实测水准高程对比结果　　表 3

检验点	大地高	正常高（CQG2000）	高程异常	正常高（实测）	较差
SZ-1D1	xxxx.283	xxxx.933	-xx.650	xxxx.682	0.251
SZ-1D2	3656.627	3700.109	-43.482	3699.772	0.337
JC01	3672.317	3715.796	-43.479	3715.338	0.458
JC02	3662.366	3705.861	-43.495	3705.622	0.239
JC03	3631.738	3675.243	-43.505	3675.112	0.131
JC04	3633.253	3676.778	-43.525	3676.428	0.350
JC05	3584.033	3627.588	-43.555	3627.226	0.362
JC06	3587.549	3631.142	-43.593	3630.674	0.468
JC07	3550.485	3594.105	-43.620	3593.736	0.369

检验点	大地高	正常高（CQG2000）	高程异常	正常高（实测）	较差
JC08	3510.585	3554.212	-43.627	3553.855	0.357
JC09	3495.626	3539.264	-43.638	3538.940	0.324
JC10	3504.165	3547.811	-43.646	3547.551	0.260
JC11	3452.517	3496.165	-43.648	3495.833	0.332
SZ-1D3	xxxx.000	xxxx.616	-xx.616	xxxx.222	-0.606
SZ-1D4	xxxx.780	xxxx.766	-xx.986	xxxx.200	0.566
SZ-1D5	xxxx.895	xxxx.732	-xx.837	xxxx.437	0.295
SZ-1D6	xxxx.174	xxxx.789	-xx.615	xxxx.367	0.422
SZ-1D7	xxxx.093	xxxx.655	-xx.562	xxxx.600	0.055
JC12	2851.369	2901.356	-49.987	2900.758	0.598
JC13	2849.679	2899.674	-49.995	2899.089	0.585
JC14	2838.686	2888.675	-49.989	2888.190	0.485
JC15	2838.763	2888.736	-49.973	2888.150	0.586
JC16	2830.188	2880.143	-49.955	2879.593	0.550
JC17	2818.255	2868.190	-49.935	2867.650	0.540
JC18	2805.618	2855.522	-49.904	2855.109	0.413
JC19	2787.796	2837.682	-49.886	2837.244	0.438
JC20	2771.145	2821.016	-49.871	2820.612	0.404
JC21	2763.077	2812.932	-49.855	2812.547	0.385
JC22	2761.494	2811.313	-49.819	2811.036	0.277

5.3 CQG2000 转换正常高和实测水准高程对比结果分析

5.3.1 2007 年对比结果分析

从表 2 中的由 CQG2000 似大地水准面模型转换后得到的正常高（水准高程）与其实际水准高程的较差计算得到的较差中误差为±0.156m。

此误差远小于±0.6m，也就是说，CQG2000 似大地水准面模型在 2007 年检验区域内的精度远优于其公布精度 0.6m。我们分析，精度偏高的原因很大程度上是 CQG2000 模型研制过程中利用了青藏公路沿线的水准资料，而此条水准路线是区内唯一的国家高等级高程控制路线。

5.3.2 2008 年对比结果分析

由于 2008 年的 29 个检验点分布于北纬 36°线南北两侧，JC01～JC11 及 SZ-1D1、SZ-1D2 等 13 个检验点在北纬 36°以南，JC12～JC22 及 SZ-1D1～SZ-1D2 等 16 个检验点在北纬 36°以北。而北纬 36°线是 CQG2000 似大地水准

面模型不同精度的分界线，将检验结果的较差中误差以北纬 36°线为界分别统计，得到的较差中误差分别为：北纬 36°以南±0.337m，北纬 36°以北±0.473m。也就是说，CQG2000 似大地水准面模型在 2008 年检验区域内的精度也优于其公布精度 0.6m（北纬 36°以南）和 0.4m（北纬 36°以北）。分析其原因，可能还是和检验区域内水准资料相对较多有关。

6．检验结论

通过上述分析可以看出，检验结果优于检验区域内 CQG2000 似大地水准面模型公布的精度，虽然这可能是受检验区域内水准资料较多的影响，但也可以看出，即便是昆仑山这一高程异常变化剧烈的地区，CQG2000 似大地水准面模型公布的精度也是可靠的。

随着我国 1：100 万区域重力调查工作的基本完成，CQG2000 似大地水准面模型也在进一步精化[5]，其精度和分辨率还在进一步提高。

如果按现有的 1：20 万区域重力调查工作的技术要求执行（GPS 控制网中 GPS 控制点高程精度优于±0.20m，测点的 GPS 测量高程精度优于±0.50m），那么，利用 CQG2000 似大地水准面模型求取区域重力调查工作中重力测点和正常高，就可以得到优于±0.81m 的重力测点高程总精度，这大大高于《区域重力调查规范（DZ/T0082-2006）》中对 1：20 万区域重力调查工作中高程总精度的要求，完全可以满足 1：20 万区域重力调查工作的需要。

7．检验结果对区域重力调查的意义

通过实地检验，证实 CQG2000 似大地水准面模型公布的精度是可靠的，利用 CQG2000 似大地水准面模型可以大大提高重力测点高程总精度，进而提高重力测量的精度，这对区域重力调查工作具有重要意义。归纳起来有以下几个方面：

⑴、青藏高原地区是我国基础测绘程度最低的地区之一。传统基础测绘工作均为上世纪八十年代以前完成，区内最大比例尺地形图均为 1：10 万；基础控制点（国家等级三角点、水准点）分布极为稀少，且部分三角点成果为概略值（一般情况为平差值），高程误差较大，加上控制点标志建立时间较长，破坏严重，已不能作为区域重力测地基础控制点（尤其是高程控制）使用。利用 CQG2000 似大地水准面模型可以有效解决青藏高原等基础测绘资料（尤其是水准资料）缺

乏，区域重力调查工作中重力测点高程求取困难的问题；

⑵、近几年在青藏高原进行区域重力调查工作时发现，部分地区已有的 1:10 万地形图还是示意图，此类图件平面位置误差和高程误差达到一百多米，几何精度很差，由国家测绘局提供的三角点成果表中，部分为概略值，这些点经用高精度 GPS 接收机检测，相互推算的坐标和高程不符值达数米，最大高程误差达 8 米，有些已知三角点和已知水准点联测后，最大差值超过 2 米。如果同一区域内多个不同单位采用不同的高程起算点进行施工，不但不能保证精度，还可能造成不同单位间成果无法拼接的情况发生（2005～2006 年在青海玉树地区进行三江北段重要成矿带 1:20 万区域重力调查时已出现这种情况）。通过建立统一的 GPS 控制网，统一使用 CQG2000 似大地水准面模型求取重力测点正常高（水准高程），就可以有效避免这种情况的发生；

⑶、在现有其它技术指标不变的情况下，通过使用 CQG2000 似大地水准面模型求取重力测点正常高，可以大幅提高重力测量的总精度。现在各地都陆续推出了更高精度的局域 CQG2000 似大地水准面模型（如青海就已研制出了 5′×5′的高精度似大地水准面精化模型），通过采用这些局域似大地水准面精化模型，可以进一步提高重力测量的总精度，这为在困难地区开展更大比例尺的重力调查工作提供了可能；

⑷、对一些极困难地区，可在总精度不变的情况下，通过调整误差分配的方法（如降低 GPS 控制网的精度、扩大 GPS 控制点的控制半径，降低重力测点的 GPS 测量精度等，甚至是降低重力观测的精度），降低野外施工的难度，保证这些地区区域重力调查工作能够顺利完成，这对可可西里西部、西昆仑等极困难地区具有非常重要的意义。

参考文献（References）：

[1] 陈俊勇，李建成，宁津生，等.**中国新一代高精度、高分辨率大地水准面的研究和实施[J].** 武汉大学学报（信息科学版），2001，26 （4）

CHEN Jun-yong；LI Jian-cheng；NING Jin-sheng；etc. **A New Chinese Geoid with High Resolution and High Accuracy[J].** Editoral Board of Geomatics and Information Science of Wuhan University,2001,26 （4）

[2] 邸志众，周纪平. **CQG2000似大地水准面模型在青藏高原地区区域重力调查中的应用[J].** 物探与化探，2007，（5）

DI Zhi-zhong；ZHOU Ji-ping. **The Application Of CQG2000 Quasi Geoid Model To Regional Gravity Survey Of Qinghai-Tibet Plateau[J].** Geophysical and Geochemical Exploration, 2007,（5）

[3] 李冲，张勤，刘站科. **CQG2000在GPS高程转换中的应用[J].** 工程勘察，2008，（7）

Li Chong；Zhang Qin；Liu Zhan-ke. **Application of CQG 2000 in GPS Elevation Conversion[J].** Geotechnical Investigation & Surveying, 2008,（7）

[4] 青海省测绘局. **青海省高精度似大地水准面的确定[R]** 2005.9

[5] 陈俊勇，李建成，宁津生，等. **全国及部分省市地区高精度、高分辨率大地水准面的研究和实施[J].** 武汉大学学报（信息科学版），2006，31 （4）

CHEN Jun-yong；LI Jian-cheng；NING Jin-sheng；etc. **Study and Implementation of Quasi Geoid Models with High Precisionand Resolution in China and Its Some Provinces and Cities [J].** Editoral Board of Geomatics and Information Science of Wuhan University,2006,31 （4）

The Application of Accuracy Inspection of CQG2000 Quasi Geoid Model to Regional Gravity Survey in Qinghai-Tibet Plateau

Geng Tao[1], Liu Kuanhou[1], Di Zhizhong[2], Li Gang[2]

(1. *X i'an Center of Geological Survey of CGS, X i'an* 710054*, China;* 2. *Developm ent and Research Center of China Geological Survey, B eijing* 100083*,China)*

Abstract: During the work of regional gravity survey, accuracy of orthometric height would influence the accuracy of gravity survey directly. With CQG2000 quasi geoid model, orthometric height with higher accuracy can be acquired through calibration of geodetic altitude measured by GPS. However, the accuracy and resolution of CQG2000 quasi geoid model are different in different areas, and the accuracy is the worst in Qinghai-Tibet plateau. The field test in Qinghai-Tibet plateau show that the accuracy of CQG2000 quasi geoid model can satisfy the accuracy of orthometric height during the work of 1:200000 regional gravity survey. Based on the test, this article summarize a method how can improve the accuracy of height measurement by GPS with CQG2000 quasi geoid model during the work of regional gravity survey, and it may be helpful to regional gravity survey.

Key Words：Quasi geoid model；Qinghai-Tibet plateau；GPS surveying；accuracy；inspection