引文格式:陈芷欣,许闯,张恒,等.采用重力梯度多尺度分析方法揭示青藏高原岩石圈结构特征[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(5):889-897.DOI:10.13203/j.whugis20220776

Citation:CHEN Zhixin,XU Chuang,ZHANG Heng,et al.Lithospheric Structure Feature of the Qinghai-Tibet Plateau Revealed by Multi-scale Analysis of Gravity Gradients[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(5):889-897.DOI:10.13203/j.whugis20220776

采用重力梯度多尺度分析方法揭示青藏高原岩石圈结构特征

陈芷欣[1,2] 许 闯[1] 张 恒[3] 余杭涛[4] 陈浩朋[1] 姚朝龙[5]

1 广东工业大学测绘工程系,广东 广州,510006
2 湛江市麻章区自然资源综合服务中心,广东 湛江,524094
3 西部矿业集团有限公司,青海 西宁,810000
4 广州海洋地质调查局,广东 广州,511458
5 华南农业大学资源环境学院,广东 广州,510642

摘 要:目前利用重力梯度数据反演岩石圈结构存在垂向识别能力不足的问题。为此,利用小波多尺度分析方法对青藏高原地区垂直重力梯度扰动进行分解,并采用功率谱分析方法估计了不同小波分解阶数重力梯度扰动的场源埋深,以获取不同深度处更为精细的结构特征。进一步根据不同阶重力梯度扰动及其平均场源深度,提取青藏高原莫霍面产生的重力梯度扰动信号,反演莫霍面地形。重力梯度扰动小波分解结果表明,小于10 km深度的浅层物质所产生的垂直梯度扰动零散分布于区域边缘和中南部;深度在20~50 km范围内的物质所产生的垂直梯度扰动主要分布在中西部和中南部,闭圈逐渐扩大;在约60 km深的区域,存在大型密度异常体;处于70 km深度以下的下地壳和上地幔区域,密度分布无明显特征。莫霍面反演结果表明,青藏高原莫霍面地形总体上呈西深东浅分布,平均深度约为48 km,最大深度约66 km,位于(78°E,35°N);所反演的青藏高原莫霍面地形与CRUST1.0模型提供的莫霍面地形的空间格局相似,且相关性约为0.83;与控制点莫霍面深度对比,所反演的莫霍面地形结果精度为8.81 km,优于CRUST1.0的11.40 km。

关键词:重力梯度;小波多尺度分析;青藏高原;岩石圈结构;莫霍面

中图分类号:P223 **文献标识码**:A **收稿日期**:2023-06-06

DOI:10.13203/j.whugis20220776 **文章编号**:1671-8860(2025)05-0889-09

Lithospheric Structure Feature of the Qinghai-Tibet Plateau Revealed by Multi-scale Analysis of Gravity Gradients

CHEN Zhixin[1,2] *XU Chuang*[1] *ZHANG Heng*[3] *YU Hangtao*[4]
CHEN Haopeng[1] *YAO Chaolong*[5]

1 Department of Surveying Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China
2 Zhanjiang City Mazhang District Natural Resources Comprehensive Service Center, Zhanjiang 524094, China
3 Western Mining Group Co. Ltd, Xining 810000, China
4 Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 511458, China
5 College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

Abstract: **Objectives**: The vertical resolution of crustal structure inverted by using gravity gradients needs to be improved at present. **Methods**: We employ wavelet multi-scale analysis method to decompose the vertical gravity gradient data in the Qinghai-Tibete Plateau, and use power spectrum analysis method to estimate the field source depth of gravity gradient with different wavelet decomposition orders. Further, according to the average field source depth of gravity gradients of different orders, the gravity gradient signals generated by the Moho of the Qinghai-Tibet Plateau are extracted to invert the Moho topography. **Results**

基金项目:国家自然科学基金(41974014,42274004);广东省自然科学基金(2022A1515010396)。

第一作者:陈芷欣,助理工程师,主要从事大地测量学与测量工程方面的研究。1769510612@qq.com

通信作者:许闯,博士,副教授。chuangxu@gdut.edu.cn

and Conclusions: The more detailed structural features at different depths are obtained. The wavelet decomposition results of gravity gradient show that the vertical gradient of disturbance generated by shallow field source less than 10 km depth is scattered in the edge and south-central of the region. The vertical gradient of the disturbance generated by the middle-level field source with a depth of 20-50 km is mainly distributed in the central and southern regions, and the closed circle gradually expands. There are large density bodies in the region of about 60 km depth. In the lower crust and upper mantle below 70 km depth, the density distribution has no obvious characteristics. The inversion results of the Moho show that the terrain of the Moho in the Qinghai-Tibet Plateau is generally deep in the west and shallow in the east, with an average depth of about 48 km and a maximum depth of about 66 km, located at (78°E, 35°N). The spatial pattern of the Moho terrain in the Qinghai-Tibet Plateau is similar to that provided by the CRUST1.0 model, and the correlation is about 0.83. Compared with the control point depths, the accuracy of the inverted Moho terrain result is 8.81 km, which is better than 11.40 km of CRUST1.0.

Key words: gravity gradient; wavelet multi-scale analysis; Qinghai-Tibetan Plateau; lithospheric structure; Moho

青藏高原由印度与欧亚两个板块碰撞后逐渐形成,海拔最高达8 848 m,拥有250万km^{2}的面积,是全球最新、海拔最高、规模最大的高原之一[1],也是全球地震活动、构造运动等壳幔活动最活跃的地区之一[2]。青藏高原的地质构造一直是国内外学者研究的热点问题。研究岩石圈结构特征对理解壳幔间的演化及相互作用、认识地球深部构造和揭示地球内部动力学演化过程具有重要意义[3-4]。

自20世纪50年代起,国内外众多学者运用多种方法对此区域开展了研究,如地震波探测、重力法等[3-5]。由于青藏高原地形崎岖险峻,造成该地区地震波数据资料稀少且不均匀[6],因此利用地震波方法获取的大范围三维地下结构空间分辨率有待进一步提高[7]。随着卫星重力计划的不断实施,重力法具有数据精度高、覆盖均匀等优势,可以获取更高空间分辨率的地下结构信息[8-9]。目前,有学者利用重力观测数据反演了青藏高原地区地下结构,如文献[10]通过对重力观测资料进行统计分析,反演了青藏高原东北缘莫霍面分布及地壳密度;文献[11]利用区域重力场提取了青藏高原地壳变形带的变化分布信息;文献[12]利用卫星重力数据研究了青藏高原地壳的隆升速率。与此同时,重力梯度测量技术也在迅速发展。在岩石圈结构反演方面,重力梯度相对于重力异常有着明显的优势,可以放大短波信号,抑制长波信号,因此能突出局部区域信息。相对于浅层物质对重力梯度的影响,地幔深部的异常体对其影响甚微[13],故采用重力梯度数据来研究青藏高原地区的岩石圈结构更加有利。文献[14]基于重力场与稳态洋流探测器(gravity field and steady state ocean circulation explorer, GOCE)重力梯度数据,利用均质长方体模型反演得到青藏高原地壳整体的平均厚度约为52.29 km。文献[15]联合GOCE观测重力梯度和EGM2008地球重力场模型,利用非等权最小二乘迭代法反演了青藏高原岩石圈三维密度结构。越来越多的学者使用重力梯度来研究青藏高原的地质结构,并且取得了较好成效。但重力梯度是地球内部所有物质的综合反映,对岩石圈结构的垂向识别能力差,需要采用有效方法进行改善[16]。小波多尺度分析方法被证明是提升重力数据垂向识别能力的有效工具[17-20]。本文利用小波多尺度分析方法对青藏高原GOCE重力梯度数据进行多尺度分析,获取不同频段重力梯度信号,以研究不同深度处构造结构的特征;同时提取莫霍面产生的重力梯度信号,反演青藏高原莫霍面地形,并采用控制点莫霍面深度评估反演结果精度。

1 计算方法

1.1 重力梯度扰动的小波多尺度分析

根据小波多尺度分析方法,将重力梯度扰动$T_g(\theta,\lambda)$分解为不同尺度下的小波细节和小波逼近,可表示为[21]:

$$T_g(\theta,\lambda)=A_l+D_l+D_{l-1}+\cdots+D_1 \quad (1)$$

式中,θ和λ分别为大地余纬和大地经度;l为最大分解阶数;A_l为重力梯度扰动的l阶小波逼近(l为不小于1的整数),即深部异常体所引起的区域扰动;D_l为经l次分解后得到的各阶小波细节,即浅层异常体所引起的局部扰动[22]。为研究不同

深度处地下结构,需要对分解的各阶小波细节进行平均场源埋深估计。

1.2　场源埋深估计

根据二维拉普拉斯方程的解,各阶小波细节 D_l 的功率 P_l 表达为[23]:

$$P_l = T_l^2 = P_{l0}\mathrm{e}^{\pm 4\pi k h} \tag{2}$$

式中,T_l 为振幅;k 为波数;h 为小波细节对应平均场源埋深;P_{l0} 为 $h=0$ 时小波细节的功率。对式(2)两边同时取自然对数得:

$$\ln P_l = \ln P_{l0} \pm 4\pi k h \tag{3}$$

通过绘制波数 k 与 $\ln P_l$ 的功率谱,进行线性拟合,即可计算出平均深度 h:

$$h = \frac{\Delta \ln P_l}{4\pi \Delta k} \tag{4}$$

1.3　重力法反演莫霍面的 Parker-Oldenburg 方法

基于先验莫霍面平均深度信息,根据估计的各阶小波细节场源埋深,提取出莫霍面起伏产生的重力梯度扰动信号 $\Delta s(x,y)$,并采用 Parker-Oldenburg 方法[24]进行反演,具体过程如下:

$$F\left[\Delta s(x,y)\right] = 2\pi G\rho \mathrm{e}^{-|k|z_0}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{|k|^n}{n!}F\left[u^n(x,y)\right] \tag{5}$$

式中,$F[\Delta s]$ 是重力梯度扰动的傅里叶变换;G 为万有引力常数;ρ 是莫霍面密度差;z_0 是莫霍面的平均深度;$u(x,y)$ 为正向下的莫霍面深度。

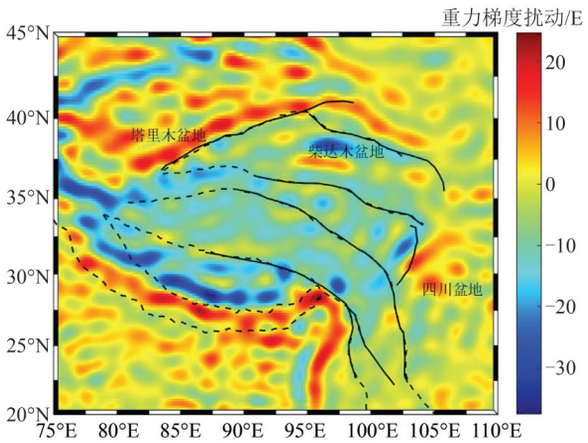
在此基础上,Oldenburg 对式(5)进行了改进,在反演中对重力梯度扰动重复迭代至收敛,从而计算起伏界面的深度[25]:

$$F\left[u(x,y)\right] = \frac{F\left[\Delta s(x,y)\right]\mathrm{e}^{|k|z_0}}{2\pi G\rho|k|} - \sum_{n=2}^{\infty}\frac{|k|^n}{n!}F\left[u^n(x,y)\right] \tag{6}$$

2　研究数据

本文采用青藏高原地区(20°N~45°N,75°E~110°E)范围内 GOCE 卫星观测的重力梯度数据,共计 31 501 个数据点,空间分辨率约为 80 km。归算至海拔 10 km 高度处的重力梯度扰动如图 1 所示(该数据已经过预处理、向下延拓和地形校正处理,下载网址为 http://goce.kma.zcu.cz/data.php? PHPSESSID=94b27766365786b0e1cef931c6f17294),研究区域地形如图 2 所示。

结合图 1 与图 2 可以看出,重力梯度扰动与地形有明显的对应关系:海拔高的地区,重力梯度扰动为负值;海拔低的地区,重力梯度扰动为正值。塔里木盆地、四川盆地和柴达木盆地重力梯度扰动呈正值。在海拔差异大的地形之间,重力梯度扰动变化剧烈,断层 $F1$~$F6$ 大多位于重力梯度扰动变化剧烈的地带。



注:实线 $F1$~$F6$ 代表断层,虚线表示不同块体之间的分界线[22]。

图 1　GOCE 垂直重力梯度扰动

Fig. 1　Vertical Gravity Gradient Disturbance from GOCE

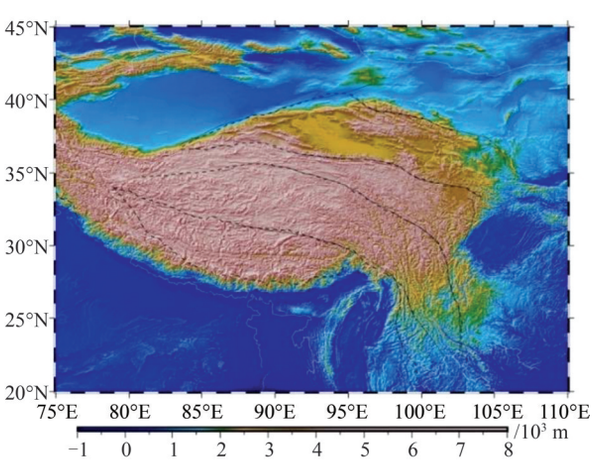


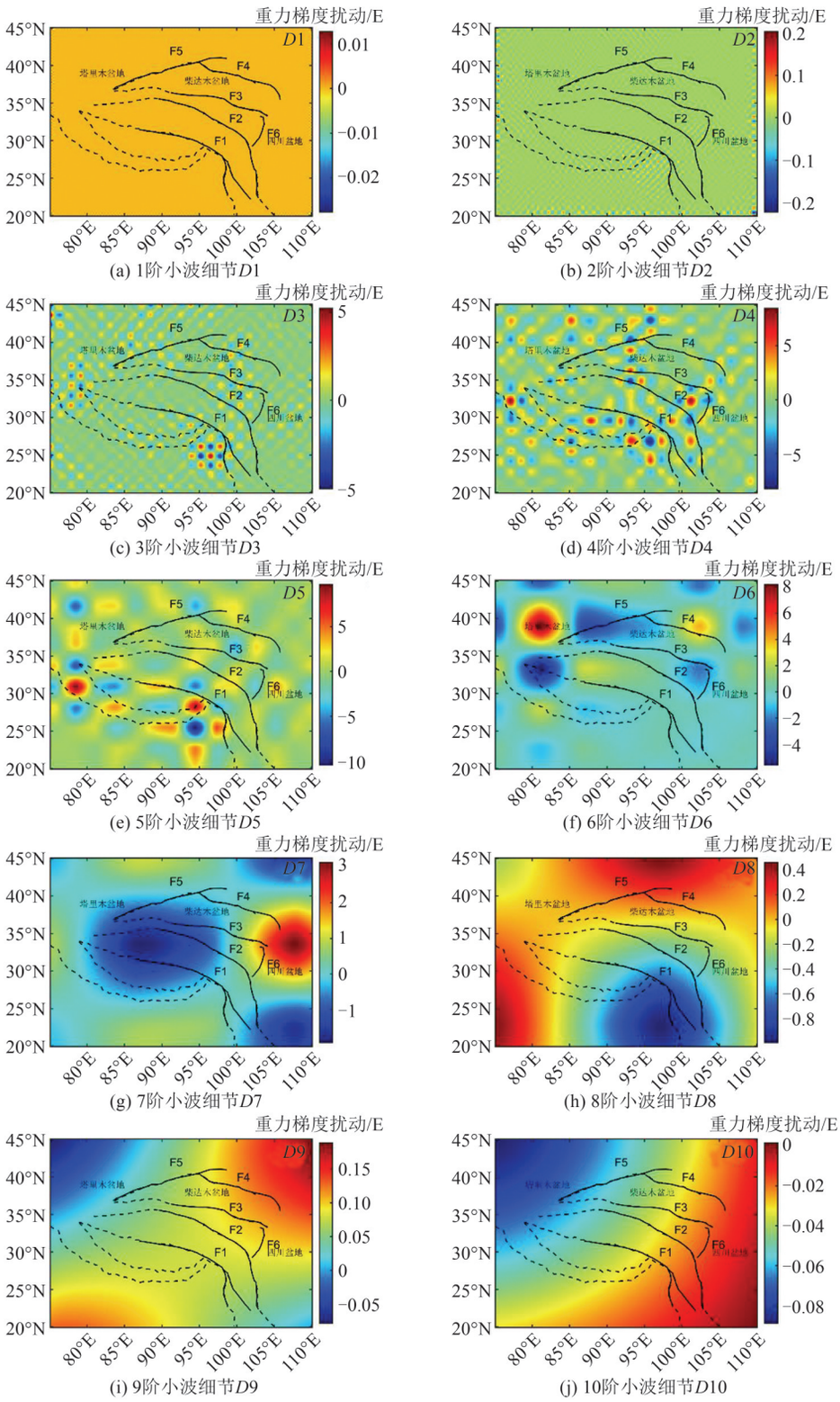
图 2　研究区域地形

Fig. 2　Topography in the Study Area

3　计算结果与分析

3.1　小波多尺度分析及场源深度估计

基于理论模拟实验分析,本文以 bior4.4 作为小波基,首先利用式(1)对青藏高原地区重力梯度扰动(图 1)分解了 10 阶(图 3 中 $D1$~$D10$ 分别为 1~10 阶小波细节,图 4 中 $A1$~$A10$ 分别为 1~10 阶小波逼近),然后采用式(4)估计出 $D1$~$D10$ 的平均场源埋深,如图 5 和表 1 所示。其中,图 5 中红色直线起点位置是曲线最高峰位置,终点位置需根据经验判断以保证曲线和直线差异的均方根最小。1 阶小波细节(图 3(a))对应平均场源埋深约为 0 km,微弱的梯度扰动现象发生在中南部和四周边缘处,可能主要是高频噪声。2 阶小



(a) 1阶小波细节$D1$　(b) 2阶小波细节$D2$

(c) 3阶小波细节$D3$　(d) 4阶小波细节$D4$

(e) 5阶小波细节$D5$　(f) 6阶小波细节$D6$

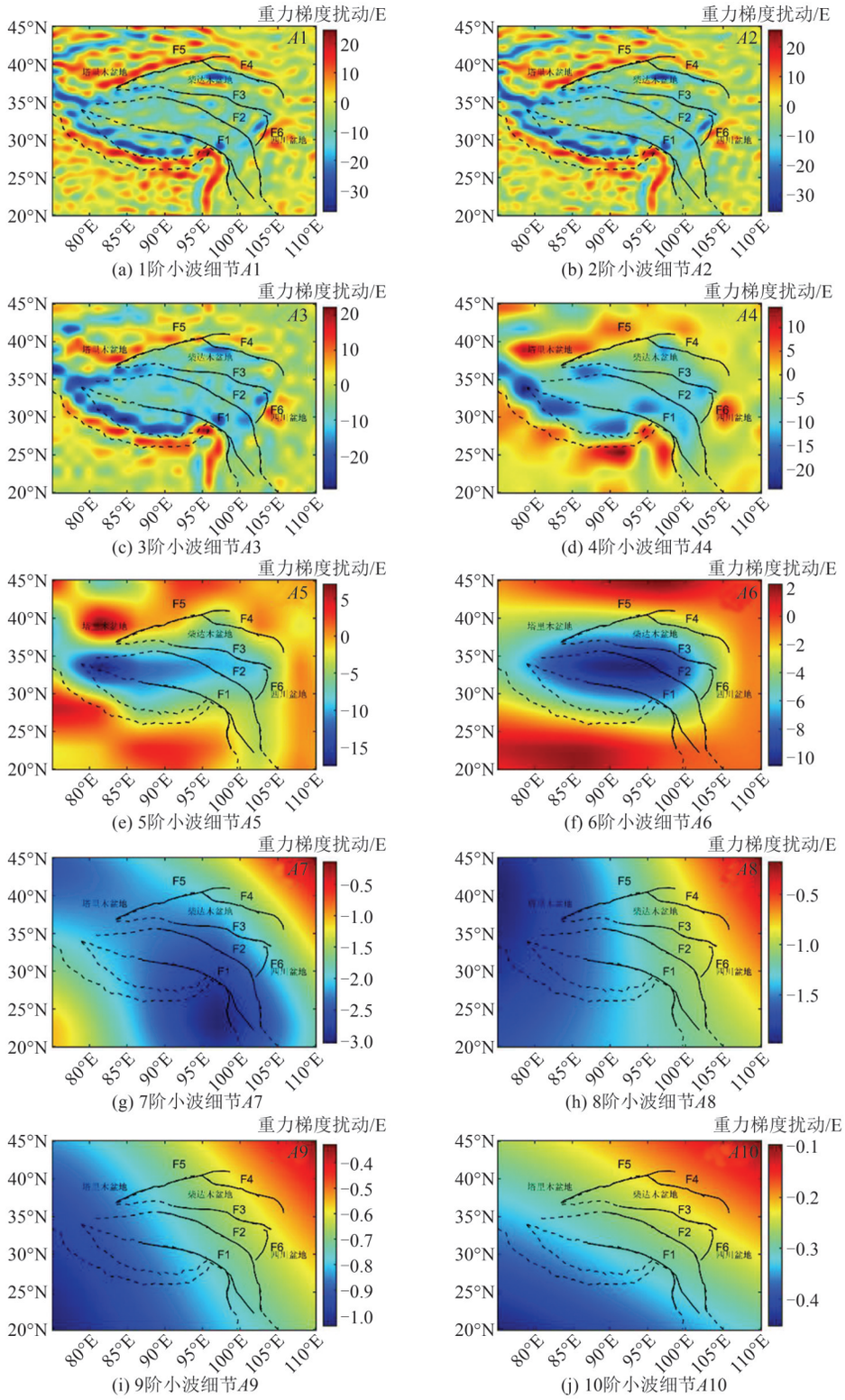
(g) 7阶小波细节$D7$　(h) 8阶小波细节$D8$

(i) 9阶小波细节$D9$　(j) 10阶小波细节$D10$

图3　1～10阶小波细节

Fig. 3　The Levels 1-10 Wavelet Details

波细节(图3(b))梯度扰动对应场源埋深约3.4 km,信号稍有增强,但仍不太明显。3阶小波细节(图3(c),场源埋深约7.4 km)与2阶相比,重力梯度扰动变化进一步增强,同时重力梯度扰动的圈闭明显增多并扩大,在西部和南部尤为明显,东南部出现棋盘状的圈闭,但梯度扰动变化仍较为平缓。4阶小波细节(图3(d))场源埋深约32.2 km,已有较为明显的梯度扰动现象,与$D3$相比,其扰动圈闭逐渐扩大,出现许多串珠状的圈闭,说明此深度的构造结构差异较显著。其中,沿中西-中南-中东走向和中东北-中东南走向的串珠状圈闭尤为突出,为－0.22 km。本文和CRUST1.0莫



(a) 1阶小波细节$A1$　(b) 2阶小波细节$A2$

(c) 3阶小波细节$A3$　(d) 4阶小波细节$A4$

(e) 5阶小波细节$A5$　(f) 6阶小波细节$A6$

(g) 7阶小波细节$A7$　(h) 8阶小波细节$A8$

(i) 9阶小波细节$A9$　(j) 10阶小波细节$A10$

图 4　1～10 阶小波逼近

Fig. 4　The Levels 1-10 Wavelet Approximations

霍面深度差的标准差、均方根值和相关系数分别约为 5.71 km、5.71 km 和 0.83,表明本文结果与 CRUST1.0 整体上具有一致性。从整体来看,1～4 阶重力梯度扰动变化缓慢且逐渐增加。5 阶小波细节(图 3(e))对应场源深度约为 53.7 km,属于地壳中下部,重力梯度扰动圈闭较大,一些浅源信息消失,场源较深、规模较大的异常体信息保留,其集中分布在西部和中东南部,整体梯度扰动变化沿西南-西北方向,梯度变化剧烈增加。6 阶小波细节(图 3(f))对应场源埋深约 60.8 km,

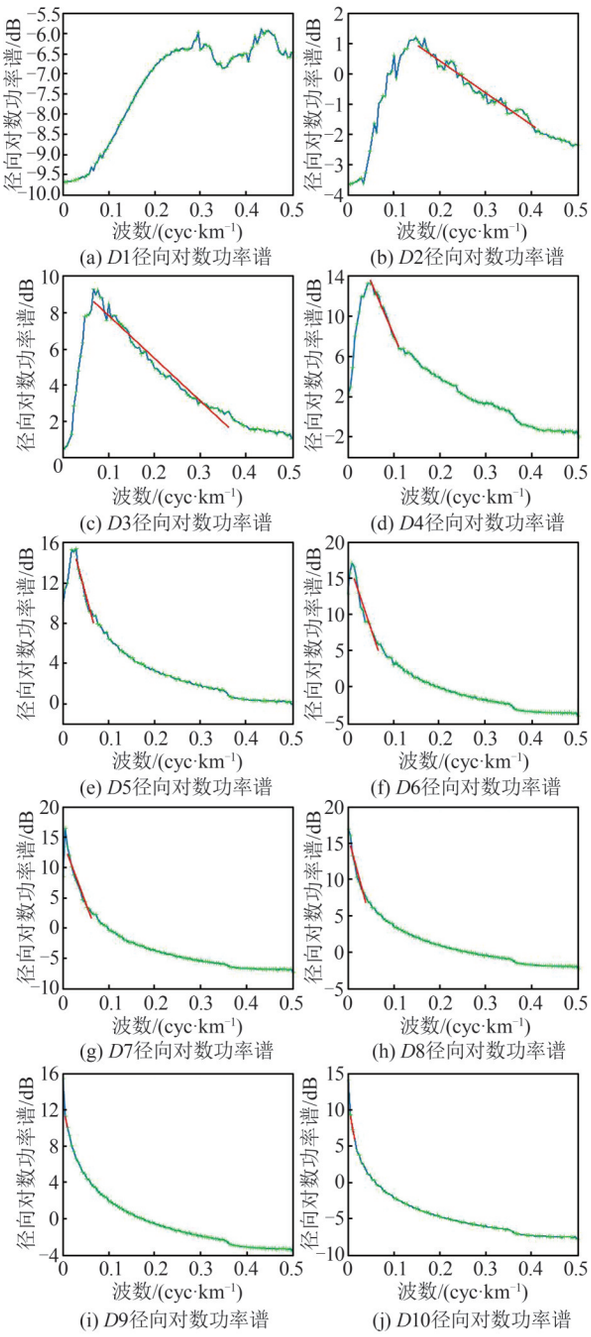


图5 1～10阶小波细节径向对数功率谱

Fig. 5 Power Spectrum of the Levels 1-10 Wavelet Details

表1 对应小波细节平均场源深度/km

Table 1 Average Source Depths of the Corresponding Wavelet Details/km

阶次	平均场源深度	阶次	平均场源深度
*D*1	0.0	*D*6	60.8
*D*2	3.4	*D*7	64.8
*D*3	7.4	*D*8	75.5
*D*4	32.2	*D*9	82.3
*D*5	53.7	*D*10	125.6

其梯度扰动圈闭进一步扩大,与5阶小波细节相比整体更平滑,主要反映出分布在西北部和中西部的大尺度异常体。7阶小波细节(图3(g))场源深度约为64.8 km,属于下地壳。该深度处中尺度异常体信号已经消失,在青藏高原中部出现大型低密度体,东部出现较大型高密度体。8阶小波细节(图3(h))与9阶小波细节(图3(i))反映的场源深度分别为75.5 km与82.3 km。*D*8中南部偏东出现一个大型低密度体,梯度扰动变化以环状向北部和西部增加。*D*9中重力梯度扰动变化较为平缓。8～9阶重力梯度变化极为缓慢,从下地壳逐渐过渡为上地幔。10阶小波细节(图3(j))的场源深度已达125.6 km,其信号已经相当微弱且平滑,总体上沿西北-东南方向逐渐增大。

5阶小波逼近如图4(e)所示,其代表53.7 km深度以下的重力梯度扰动,与4阶小波逼近相比有较明显的变化;6阶小波逼近如图4(f)所示,主要反映60.8 km以下物质分布;7～10阶小波逼近分别如图4(g)～4(j)所示,从整体上看,变化趋近一致。

综上所述,GOCE卫星重力梯度对中地壳(32.3～64.8 km深度)的密度异常比较敏感,对上地壳密度异常次之,对上地幔密度异常最不敏感。通过对重力梯度扰动进行小波多尺度分析,极大增强了重力梯度数据的垂向识别能力,可以清晰地获取不同深度处异常物质的分布特征。

3.2 莫霍面地形反演结果

根据先验信息[6-7],青藏高原地区莫霍面起伏范围为30～80 km。根据表1的结果可知,1～3阶小波细节的场源深度远小于莫霍面深度,不属于莫霍面起伏产生的重力梯度信号;4阶小波细节的场源深度为32.2 km,已经达到莫霍面起伏深度范围,开始含有莫霍面起伏产生的重力梯度信号。5～8阶小波细节的场源深度均在莫霍面起伏深度范围内,因此在忽略上地幔及更深部不均匀性影响的条件下,本文近似认为3阶小波逼近(图4(c))为莫霍面产生的重力梯度信号,并采用式(6)估计出莫霍面结果,如图6所示。其中,研究区域莫霍面平均深度为38 km,密度差为0.48 kg/cm^{3}作为先验信息[26]。

图6中,青藏高原莫霍面形态复杂,深度跨度大,总体趋势为西部较深,东部较浅,说明印度板块与欧亚板块在西部的碰撞早于东部。中西部莫霍面深度大于60 km,与Li等[27]结果一致;莫霍面最深处约66 km,位于西羌塘地区(78°E,35°N)。最深处与最浅处相差约30 km,莫霍面平均深度约48 km。

地体边界和主要断层边界大多位于深度高

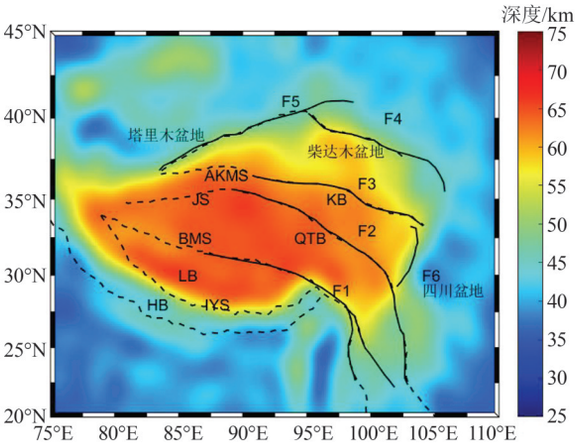


图 6　莫霍面地形

Fig. 6　Moho Terrain

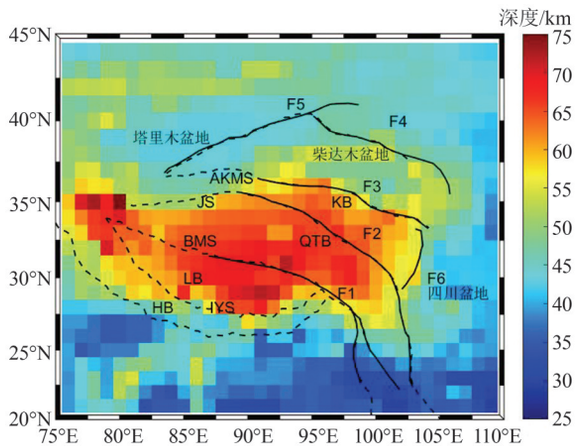


图 7　CRUST1.0 提供的莫霍面地形

Fig. 7　Moho Terrain Provided by CRUST1.0

低转换带上。以羌塘块体(QTB)为中心,青藏高原莫霍面呈现出中部深、边缘浅的特征。羌塘块体莫霍面深度最深能达 66 km,变化梯度趋缓,相对平坦,深度约在 63～66 km 范围。羌塘块体以南的拉萨块体(LB)莫霍面较深,深度与羌塘块体相比差距不大,平均莫霍面深度约 62 km。继续往南,在块体交界处梯度变化剧烈,非常陡峭;在雅鲁藏布江缝合带(IYS)有一个明显的莫霍面突变,约 5 km[7]。喜马拉雅块体(HB)莫霍面平均深度约 45 km,从北向南深度急剧骤减,且变形剧烈,从 60～65 km 变浅至 40～45 km,块体岩石圈正处于印度板块向欧亚板块碰撞的变化中。

羌塘块体以北莫霍面深度总体逐渐变浅,呈台阶状逐步抬升。从羌塘块体北缘 63 km 到昆仑块体(KB)北缘 60 km,昆仑块体的莫霍面深度由西部的 63 km 向东逐渐抬升为 53 km。昆仑块体的北部是柴达木盆地,柴达木盆地中部存在莫霍面上隆现象,表现为外侧深、中间浅的特征。中部深度约为 53 km,从中部向四周逐渐变深至盆地边缘,边缘深度约 60 km,与高锐等[28]的结果相符合。塔里木盆地位于青藏高原西北地区,其莫霍面深度约为 43～49 km。东部的四川盆地的莫霍面深度约为 40 km,与 Shin 等[29]给出的结果一致。

从上述结果来看,莫霍面地形的反演结果与以往结果基本一致,可以较好地反映出研究区域的构造特点。为验证本文结果的正确性与有效性,图 7 给出了由 CRUST1.0 提供的莫霍面地形,表 2 给出了本文与 CRUST1.0 莫霍面结果之间的差异。

对比图 6 和图 7 可知,本文与 CRUST1.0 之间的莫霍面地形空间分布是相似的,但本文反演结果具有更好的空间分辨率。由表 2 可以看出,CRUST1.0 的莫霍面最大深度约为 74.81 km,本文莫霍面最大深度约为 65.94 km,两者莫霍面深度差值在－16～20 km,深度差值的平均值约为－0.22 km。本文和 CRUST1.0 莫霍面深度差的标准差、均方根值和相关系数分别约为 5.71 km、5.71 km 和 0.83,表明本文结果与 CRUST1.0 整体上具有一致性。

表 2　本文与 CRUST1.0 莫霍面深度及其差异的统计/km

Table 2　Statistics of Moho Depth and Its Difference Between CRUST1.0 and This Paper/km

统计项	最大值	最小值	平均值	标准差	均方根	相关系数
CRUST1.0	74.81	27	48.14	10.06	—	—
本文	65.94	35.41	48.37	9.13	—	—
本文－CRUST1.0	19.94	－16.20	－0.22	5.71	5.71	0.83

为进一步评估本文结果的精度,将本文莫霍面和 CRUST1.0 莫霍面分别与地震波方法获取的控制点(共 215 个[30])莫霍面深度进行对比,结果如表 3 所示。由表 3 可知,本文结果和控制点莫霍面深度之间差异的均方根约为 8.81 km,相关系数约为 0.76;CRUST1.0 和控制点莫霍面深度之间差异的均方根约为 11.40 km,相关系数约为 0.56,可见本文反演的莫霍面地形优于 CRUST1.0。

4　结　语

本文采用小波多尺度分析方法对 GOCE 垂直重力梯度扰动进行了分解,获取了青藏高原不同场源深度的重力梯度扰动信号,分析了不同深度处物质分布特性。结果表明,本文采用小波多尺度分析方法可有效提升重力梯度数据对地球

表3 本文模型和CRUST1.0莫霍面与控制点深度差异的统计/km

Table 3 Statistics on the Depth Difference of Control Points Between This Paper and Moho Surface/km

统计项	最大值	最小值	平均值	标准差	均方根	相关系数
CRUST1.0—控制点	30.69	−27.13	0.93	11.39	11.40	0.56
本文—控制点	31.83	−25.19	0.15	8.83	8.81	0.76

内部结构的垂向识别能力,从而揭示青藏高原地区更精细的地下结构;不同深度的重力梯度异常分布特征不同,浅层场源所产生的梯度扰动密集分布在边缘和中南部,总体分布不均匀;中层场源所产生的重力梯度扰动主要分布在中西部和中南部,闭圈逐渐扩大,呈条带分布特征;下地壳和上地幔区域,重力梯度扰动比较平滑,分布特征无明显规律。反演的青藏高原莫霍面地形整体上与前人结果吻合;与控制点莫霍面深度对比表明,本文反演的莫霍面精度优于CRUST1.0。

参 考 文 献

[1] 张燕,程顺有,赵炳坤,等. 青藏高原构造结构特点:新重力异常成果的启示[J]. 地球物理学报,2013,56(4):1369-1380.
ZHANG Yan, CHENG Shunyou, ZHAO Bingkun, et al. The Feature of Tectonics in the Tibetan Plateau from New Regional Gravity Signals[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(4): 1369-1380.

[2] 朱传东,刘金钊,陈铭,等. 青藏高原大尺度地表流体的重力效应特征分析[J]. 大地测量与地球动力学,2020,40(9):947-951.
ZHU Chuandong, LIU Jinzhao, CHEN Ming, et al. The Analysis on Characteristics of Gravity Effect of Large-Scale Surface Fluid in Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2020, 40(9): 947-951.

[3] 李秋生,彭苏萍,高锐. 青藏高原莫霍面的研究进展[J]. 地质论评,2004,50(6):598-612.
LI Qiusheng, PENG Suping, GAO Rui. A Review on the Moho Discontinuity Beneath the Tibetan Plateau[J]. *Geological Review*, 2004,50(6): 598-612.

[4] 何慧优,方剑,陈铭,等. 利用重力数据反演中国东海海域莫霍面深度[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2019,44(5):682-689.
HE Huiyou, FANG Jian, CHEN Ming, et al. Moho Depth of the East China Sea Inversed Using Gravity Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(5): 682-689.

[5] 卢占武,高锐,李秋生,等. 中国青藏高原深部地球物理探测与地球动力学研究(1958—2004)[J]. 地球物理学报,2006,49(3):753-770.
LU Zhanwu, GAO Rui, LI Qiusheng, et al. Deep Geophysical Probe and Geodynamic Study on the Qinghai-Tibet Plateau (1958—2004)[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006,49(3): 753-770.

[6] 邓文彬,苏丹竞,高宇潇,等. 不同重力场模型对青藏高原莫霍面反演的影响[J]. 测绘科学,2020,45(4):1-6.
DENG Wenbin, SU Danjing, GAO Yuxiao, et al. Effect of Various Gravity Field Models on the Moho Topography Inversion in the Tibetan Plateau[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2020, 45(4): 1-6.

[7] XU C, LIU Z W, LUO Z C, et al. Moho Topography of the Tibetan Plateau Using Multi-Scale Gravity Analysis and Its Tectonic Implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2017, 138: 378-386.

[8] 宁津生,王正涛,超能芳. 国际新一代卫星重力探测计划研究现状与进展[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2016,41(1):1-8.
NING Jinsheng, WANG Zhengtao, CHAO Nengfang. Research Status and Progress in International Next-Generation Satellite Gravity Measurement Missions[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(1): 1-8.

[9] 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.

[10] 祝意青,梁伟锋,陈石,等. 青藏高原东北缘重力变化机理研究[J]. 大地测量与地球动力学,2012,32(3):1-6.
ZHU Yiqing, LIANG Weifeng, CHEN Shi, et al. Study on Mechanism of Gravity Field Change in Northeastern Margin of Qinghai-Tibet Peateau[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2012,32(3): 1-6.

[11] 杨文采,孙艳云,于常青. 青藏高原地壳密度变形带及构造分区[J]. 地球物理学报,2015,58(11):4115-4128.
YANG Wencai, SUN Yanyun, YU Changqing. Crustal Density Deformation Zones of Qinghai-Tibet Plateau and Their Geological Implications[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(11): 4115-4128.

[12] 段虎荣,康明哲,吴绍宇,等. 利用GRACE时变重力场反演青藏高原的隆升速率[J]. 地球物理学报,2020,63(12):4345-4360.
DUAN Hurong, KANG Mingzhe, WU Shaoyu, et al. Uplift Rate of the Tibetan Plateau Constrained by GRACE Time-Variable Gravity Field[J]. *Chinese*

Journal of Geophysics, 2020, 63(12): 4345-4360.

[13] 黎晋博, 许闯, 简光煜, 等. 中国南海重力梯度多尺度分析[J]. 测绘科学, 2020,45(11): 1-7.
LI Jinbo, XU Chuang, JIAN Guangyu, et al. Multi-scale Analysis of Gravity Gradients in South China Sea[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2020,45(11): 1-7.

[14] 夏朝龙. 基于GOCE梯度数据反演青藏高原地壳厚度[J]. 才智, 2013(14): 289-290.
XIA Chaolong. Inversion of Crustal Thickness of Qinghai-Tibet Plateau Based on GOCE Gradient Data[J]. *Intelligence*, 2013(14): 289-290.

[15] 李红蕾, 方剑, 王新胜, 等. 重力及重力梯度联合反演青藏高原及邻区岩石圈三维密度结构[J]. 地球物理学报, 2017,60(6): 2469-2479.
LI Honglei, FANG Jian, WANG Xinsheng, et al. Lithospheric 3-D Density Structure Beneath the Tibetan Plateau and Adjacent Areas Derived from Joint Inversion of Satellite Gravity and Gravity-Gradient Data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(6): 2469-2479.

[16] 蒋涛. 利用航空重力测量数据确定区域大地水准面[D]. 武汉:武汉大学, 2011.
JIANG Tao. Regioanl Geoid Determination Using Airborne Gravimetry Data[D]. Wuhan: Wuhan University, 2011.

[17] 侯遵泽, 杨文采. 小波分析应用研究[J]. 物探化探计算技术, 1995, 17(3): 1-9.
HOU Zunze, YANG Wencai. An Operational Research on the Wavelet Analysis [J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 1995, 17(3): 1-9.

[18] 吴立辛, 杨明芝, 赵卫明, 等. 利用重力多尺度分解资料反演青藏高原东北缘地壳厚度[J]. 大地测量与地球动力学, 2011, 31(1): 19-23.
WU Lixin, YANG Mingzhi, ZHAO Weiming, et al. Crust Thickness Inversed from Multi-scale Decomposition of Bouguer Gravity Anomalies in Northeastern of Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2011, 31(1): 19-23.

[19] 玄松柏. 青藏高原东缘地壳结构与物质运移的重力研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2016.
XUAN Songbai. Gravity Study on Crustal Structure and Material Migration Beneath the Eastern Tibetan Plateau[D]. Wuhan: Wuhan University, 2016.

[20] 付强, 刘天佑, 马龙, 等. 基于小波变换和均衡重力异常的断裂识别: 以柴达木盆地及周边地区为例[J]. 地震地质, 2019,41(4): 960-978.
FU Qiang, LIU Tianyou, MA Long, et al. Wavelet Transform Analyses of Faults Detection on Isostatic Gravity Anomalies: A Case Study from the Qaidam Basin and Its Adjacent Areas[J]. *Seismology and Geology*, 2019,41(4): 960-978.

[21] 陈丽, 艾力夏提·玉山, 朱治国, 等. 北天山中段时变重力场离散小波多尺度分解[J]. 中国地震, 2020,36(4): 935-944.
CHEN Li, AILIXIATI Yushan, ZHU Zhiguo, et al. Multi-scale Decomposition of Wavelet of the Temporal Gravity Variation in Northern Tianshan Mountain[J]. *Earthquake Research in China*, 2020, 36(4): 935-944.

[22] XU C, LUO Z C, SUN R, et al. Multilayer Densities Using a Wavelet-Based Gravity Method and Their Tectonic Implications Beneath the Tibetan Plateau[J]. *Geophysical Journal International*, 2018, 213(3): 2085-2095.

[23] SPECTOR A. Statistical Models for Interpreting Aeromagnetic Data[J]. *Geophysics*, 1970, 35(2): 293.

[24] 邢志斌. GOCE卫星重力梯度数据恢复地球重力场理论与方法研究[D]. 郑州: 信息工程大学, 2019.
XING Zhibin. Study on the Theory and Method of Recovering the Earth's Gravity Field from GOCE Satellite Gravity Gradient Data[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2019.

[25] OLDENBURG D W. The Inversion and Interpretation of Gravity Anomalies[J]. *Geophysics*, 1974, 39(4): 526.

[26] 史庆斌, 胡双贵, 杨磊. 基于高精度卫星重力数据反演青藏高原莫霍面深度[J]. 工程地球物理学报, 2018,15(4): 466-474.
SHI Qingbin, HU Shuanggui, YANG Lei. Inversion of Moho Depth in Tibetan Plateau Based on High-Precision Satellite Gravity Data[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2018,15(4): 466-474.

[27] LI H O, XU X W, JIANG M. Deep Dynamical Processes in the Central-Southern Qinghai-Tibet Plateau: Receiver Functions and Travel-Time Residuals Analysis of North Hi-Climb[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2008, 51(9): 1297-1305.

[28] 高锐, 熊小松, 李秋生, 等. 由地震探测揭示的青藏高原莫霍面深度[J]. 地球学报, 2009,30(6): 761-773.
GAO Rui, XIONG Xiaosong, LI Qiusheng, et al. The Moho Depth of Qinghai-Tibet Plateau Revealed by Seismic Detection[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2009,30(6): 761-773.

[29] SHIN Y H, SHUM C K, BRAITENBERG C, et al. Moho Topography, Ranges and Folds of Tibet by Analysis of Global Gravity Models and GOCE Data[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 11681.

[30] MANDAL P, SRINIVAS D, SURESH G, et al. Modelling of Crustal Composition and Moho Depths and Their Implications Toward Seismogenesis in the Kumaon-Garhwal Himalaya[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 14067.