寇岚,张进.基于重力异常反演的三维地震波速度结构分析方法研究[J].地震工程学报,2019,41(5):1259-1265.doi:10.3969/j. issn.1000-0844.2019.05.1259

KOU Lan, ZHANG Jin. An Analysis Method for Three-dimensional Seismic Wave Velocity Structures Based on Gravity Anomaly Inversions[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(5):1259-1265.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1259

基于重力异常反演的三维地震波速度 结构分析方法研究

寇 岚1,张 进2

(1. 湖北交通职业技术学院, 湖北 武汉 430079; 2. 长江大学, 湖北 荆州 434020)

摘要:利用重力异常反演测试三维地震波速度结构,存在解不唯一、可靠性不高的问题。将面波反 演充分融合到重力异常反演方程中,降低传统反演方法的非唯一性,并提升可靠性。以川滇地区为 例,采用融合后的重力异常反演方法分析三维地震波速度结构。通过速度和密度的关系转换,得到 对应的重力异常数据。由于面波频射数据主要对地震波横波速度敏感,因此将重力异常数据和初 始横波速度相连,依据地震波速度和岩石密度之间的关系,获取重力异常反演方程,用于分析速度 结构。选取 21.6°~34.2°N、97.1°~105.9°E 范围内的川滇地区活动块体作为实验数据,经过实验分 析发现:使用该方法迭代反演川滇地区地壳上地幔顶部横波速度,重力异常数据和面波频射数据的 残差值分别是 6.24 mGal 和 0.027 km/s,实际拟合效果较好;分析该地区不同深度切面横波速度发 现,在 24 km 深度处,上地壳中含有相对低速层,在 44 km 深度处,中下地壳中存在低速层;且该方 法分析川滇地区三维地震波速度结构解的分辨率较高。

关键词:重力;异常反演;三维地震波;速度结构;横波速度;岩石密度
中图分类号:P315
文献标志码:A
文章编号:1000-0844(2019)05-1259-07
DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1259

An Analysis Method for Three-dimensional Seismic Wave Velocity Structures Based on Gravity Anomaly Inversions

KOU Lan¹, ZHANG Jin²

(1. Hubei Communication Technical College, Wuhan 430079, Hubei, China;
2. Yangtze University, Jingzhou 434020, Hubei, China)

Abstract: Using the inversion of gravity anomaly to test three-dimensional seismic wave velocity structures has some drawbacks, e.g., the solution is not unique and the reliability is not high. The surface wave inversion is fully fused to the gravity anomaly inversion equation, which reduces the non-uniqueness of the traditional inversion method and improves its reliability. Taking the Sichuan—Yunnan area as an example, the 3-D seismic velocity structure was analyzed using the fused gravity anomaly inversion method. Through conversion of velocity and density, the cor-

收稿日期:2018-12-21

基金项目:国家自然科学基金项目(41402113)

第一作者简介:寇 岚(1985-),女,湖北武汉人,硕士,讲师,研究方向:建筑装饰工程技术。E-mail:koulan20@yeah.net。

responding gravity anomaly data was obtained. Because surface wave frequency data were sensitive mainly to seismic shear wave velocity, gravity anomaly data and initial shear wave velocity were connected. According to the relationship between seismic wave velocity and rock density, an inversion equation of the gravity anomaly was obtained to analyze the velocity structure. Active blocks of the Sichuan—Yunnan area, in the range of 21.6° — 34.2° N, 97.1° — 105.9° E, were selected for experimental data. Through experimental analysis, it was found that the residual values of gravity anomaly data and surface wave frequency data were 6.24 mGal and 0.027 km/s, respectively, and the fitting effect was good. Through analysis of shear wave velocities at different depths in this area, it was found that at the 24-km depth, there are relatively low-velocity layers in the upper crust, and low-velocity layers in the middle and lower crusts at depths of 44 km. Resolution of this method for analyzing the structural solution of three-dimensional seismic wave velocity in the Sichuan–Yunnan region was high.

Keywords: gravity; anomaly inversion; three-dimensional seismic wave; velocity structure; shear wave velocity; rock density

0 引言

随着科技的发展,地球科学在多个领域上取得 了重要进步,尤其在观测和探测地球内部各岩石圈 结构、获取岩石圈图像等能力上均有显著提升^[1]。 1970年地球科学研究学者第一次采用体波反演方 法分析地球中地幔三维速度结构,通过分析结果发 现全球板块构造和地幔速度之间存在明显关联^[2]。 相关学者通过全球数字地震台网三维层析成像,分 析地球内部震动规律,研究地球内部动力学和地球 内部各圈层横向不均匀程度,其结果对研究地球物 理方面的问题具有重大意义^[3]。

有研究发现,通过多种三维层析成像方法可研 究地球内部各岩石圈结构。在绝大多数情况下,不 同三维层析成像方法构建的模型具有显著差异^[4]。 因为地球物理反演本身存在多解特性,为增强解的 唯一性,需在地球物理反演中添加约束条件,即添加 重力异常约束进行物理特征反演。在地震研究中, 通常在反演中将重力和地震数据相结合进行联合反 演^[5]。在重力异常反演应用到地震分析的过程中, 如何取得唯一性结果,一直是一个难点^[6]。

川滇地区地处我国青藏高原的东南端,邻接东 南亚板块和扬子地台,其地质构造活动和板块间的 碰撞有显著关系,板块碰撞主要是指欧亚板块和印 度板块之间的碰撞。川滇地区地质活动断裂发育, 同时频繁出现强烈地震和大地震活动^[7],因此本文 以该地区为例,采用重力异常反演方法分析该地区 的三维地震波速度结构,探析其深部构造背景和动 力作用环境,其中深部构造背景主要和地震、区域活 动区块体之间存在显著关联。

1 三维地震波速度结构分析方法

1.1 地震数据的采集

从地质活动构造的角度出发,经过调查分析发现,由于不同活动断裂带的规模存在差异,其地震波 速递特征也有所区别^[8]。在多个不同的活动断裂带 划分川滇地区时,将该地区分割成多种级别的活动 块体,本文选取 21.6°~34.2°N、97.1°~105.9°E 范围 内的川滇地区活动块体作为地震数据来源,研究该 范围内活动块体的三维地震波速度结构。部分活动 带划分图如图 1 所示。



图 1 中,川滇地区活动块体的地形从 SRTM 数据中选取,地形分辨率深度为 30.12 m,在研究地震 波走势时,参考 2012—2018 年中国地震局观测数据

1261

和四川、云南区域地震台网观测报告^[9]。为提升重 力异常反演中均匀覆盖射线的数量和数据的精准 性,根据下述原则筛选数据:(1)在定位为一类的地 震中选取地震数据,且确保该定位的精准性;(2)所 选地震数据被不少于三个台站记录;(3)从 206 个台 站中筛选 2012—2018 年记录的地震波射线数 据^[10]。

1.2 重力异常反演方程设计

在设计重力异常反演方程的过程中,需充分考 虑面波反演,将面波反演充分融合到重力异常反演 方程中,实现面波和重力的联合反演。

地震橫波速度 V_h影响面波频散数据,通过速度 和密度的转换得到重力异常数据,该数据和地震横 波速度之间存在明显联系。假设 n₀表示初始横波 速度模型,重力异常反演方程表达式为:

$$\begin{bmatrix} \sqrt{\frac{q(z)}{\alpha_{h}^{2}}} \mathbf{A}_{h} \\ \sqrt{\frac{1}{\alpha_{p}^{2}}} \mathbf{A}_{h} \\ \sqrt{\frac{1}{\alpha_{p}^{2}}} \mathbf{A}_{p} \\ \beta \mathbf{\Delta} \\ \mathbf{H} \\ \mathbf{R} \end{bmatrix} \mathbf{n} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{q(z)}{\alpha_{h}^{2}}} s_{h} \\ \sqrt{\frac{1}{\alpha_{p}^{2}}} s_{p} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{q(z)}{\alpha_{h}^{2}}} \mathbf{A}_{h} \\ \sqrt{\frac{1}{\alpha_{p}^{2}}} \mathbf{A}_{p} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \mathbf{n}_{0} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \mathbf{R} \end{bmatrix} \mathbf{n}_{a}$$

$$(1)$$

式中:A_h表示面波频散数据对横波速度偏导矩阵; A_p表示重力异常对横波速度偏导矩阵;α_h表示平衡 面波数据约束模型的权重;α_p表示重力数据约束模 型的权重;s_h表示面波数据残差;s_p表示重力数据残 差;q(z)表示不同面波周期权重;Δ表示深度方向 上平滑正则化矩阵;H表示水平方向上平滑正则化 矩阵;R表示先验模型n_a约束矩阵。通过LSQR算 法对重力异常反演方程进行求解,采用框架流程展 示重力异常反演方法流程(图 2)。

从图 2 中可以看出,在采用重力异常反演方法 分析三维地震波速度结构时,需先模拟参数化地震 横波速度模型,再根据 Brocher 横纵波速度关系^[11] 转换纵波速度模型,获取岩石圈密度、地震纵波速度 和地震横波速度,最后采用 DISPER80 方法^[12]计算 面波频散正演和重力异常正演^[13],获取重力异常残 差项和最小面波残差项等数值,得到最终的模型。 从理论上来说,地震横波、纵波速度和密度的函数就 是面波频散^[14],但经过实际调查研究发现,面波频 散对横波速度的敏感度较高,对密度和纵波速度的敏 感度较低。基于上述分析,在重力异常反演过程中仅 研究地震横波速度对频散曲线的影响程度是可行的。



Fig.2 Gravity anomaly inversion method

1.2.1 初始速度参考值选取

采用重力异常反演方法分析三维地震波速度结构时,需先采用网格方法参数化地震横波速度模型,即在二维平面内划分 21.6°~34.2°N、97.1°~105.9°E范围内的川滇地区活动块体,将其划分成多个均匀网格,网格规模为 0.51°×0.51°。通过连续分布函数表示模型中的速度分布状况,采用内插方式计算网格中任意一点速度,经过实际调查分析和研究以往学者的文献,筛选出一维初始速度参考值(表 1)。

表1 初始速度参考值

Table 1	Reference value of initial velocity
深度/km	地震横波/(km・s ⁻¹)
0	5.49
4	5.91
14	6.12
24	6.43
34	6.78
44	7.46
64	7.84
84	7.94

1.2.2 地震波速度与密度关系建模

密度和地震波之间经常使用的一个经验关系 为:

$$B=3.124\rho-2.41$$
 (2)

式中:β表示地震纵波速度;ρ表示地震介质密度。 式(2)仅适用于上地幔和地壳之间的岩石,且该岩石 应具备较大的密度和较深的埋藏深度^[15],因此设计 适用于千层沉积物,且经常使用的密度和地震波之 间的关系式:

$$\beta = 6.85 - 7.54\rho + 2.63\rho^2 \tag{3}$$

采用分段函数结合两个经验函数,得到:

$$\rho(\beta) = \cos^{2} \chi \rho_{1}(\beta) + \sin^{2} \chi \rho_{2}(\beta)$$
(4)
式中: $\rho_{1}(\beta)$ 表示式(2): $\rho_{2}(\beta)$ 表示式(3):日:

$$\chi = \frac{\pi}{2} \frac{1 + \tan \omega \left[\varepsilon \left(\gamma - \gamma_c \right) \right]}{2} \tag{5}$$

式中:w 表示地震波入射角度;ε 代表地震波振幅; γ、γ。分别表示均匀介质下和非均匀介质下的频 散。

经实际调查研究发现,面波频散对横波速度的 敏感度较高,在重力异常反演过程中仅研究横波速 度对频散曲线的影响程度是可行的,因此通过 Brocher横纵波速度关系转换纵波速度模型,得到横 波速度模型,转换关系如下:

$$V_{\rm p} = 0.940 \ 8 + 2.094 \ 6V_{\rm h} - 0.820 \ 5V_{\rm h}^2 + 0.268 \ 2V_{\rm h}^3 - 0.025V_{\rm h}^4$$
(6)

1.2.3 模型估计解的分辨率计算

在估计解的分辨率时,需采用检测板方法,其基本原理如下:在设定一个速度模型参数的前提下,扰动各个节点正负相关,选取的扰动值应是正常值的 ±3.1%;采用正演计算的方法,依照实际的射线分布 状况获取理论地震波走时数据,将一定的随机误差添 加到理论地震波走时数据中,将其当成是观测数据进 行重力异常反演;对比检测板和反演结果的相似程 度,将得到的相似程度当成是解的可靠性估计。

2 应用与实验验证分析

2.1 重力异常分布和面波频射分布对比

为验证本文方法拟合川滇地区重力异常数据和 面波频射数据的精准性,选取 1.1 节的数据进行试 验。对比本文方法和基于区域地震的分析方法,得 到的对比结果如图 3、4 所示。



图 3 重力异常分布对比结果

Fig.3 Comparison results of gravity anomaly distribution





Fig.4 Comparison results of surface wave frequency distribution

从图 3、4 中可以看出,应用区域地震的分析方法时,面波频射数据的残差值不断下降,从 0.175 km/s逐渐降低到 0.038 km/s,该方法对重力异常

数据的拟合效果较差,重力异常数据的残差是 44.42 mGal。本文方法得到的面波频设数据残差值 是0.027 km/s,相比基于区域地震的分析方法要小, 同时本文方法得到的重力异常数据残差值为 6.24 mGal,明显小于对比方法得到的结果,说明本 文方法能更好地拟合面波频射数据和重力异常 数据。

2.2 不同深度切面的速度结构

利用模型对川滇地区地壳上地幔顶部横波速度 进行3次不同深度的迭代反演。经过对比分析发 现,设平均初始重力异常数据和面波频射数据的残差值分别是 6.79 mGal 和 0.035 km/s,在经过 3 次迭代后,本文模型在不同深度的初始重力异常数据和面波频射数据的残差值分别是 6.24 mGal 和 0.027 km/s,对比之前学者的研究结果,本文方法误差较小。经过重力异常反演得到的不同深度切面横波速度分布反演如图 5 所示。





Fig.5 Shear wave velocity distribution of section at different depth

从图 5 中可以看出,24 km 深度图像显示中地 壳和上地壳速度横向变化,44 km 深度图像显示下 地壳速度横向变化,84km 深度图像显示上地幔和 上下地壳底部速度横向变化。

对比图 1 和图 3 可以看出,在中地壳 24 km 深 度处,川滇地区大雪山、贡嘎山和峨眉山等地的负异 常情况较为明显,其中云南地区地震波横向变化幅 度较小,元谋地区附近和滇中地区负异常情况较多 且较为显著,说明在 24 km 深度处,上地壳中含有 相对低速层。在 44 km 深度处,川滇地区川西多数 山峰速度负异常分布较为显著,多数山体下也存在 显著的负异常,例如大凉山、岷山等山体,说明在 44 km深度处,本文划分的活动带中速度负异常区 占有较大比重,尤其是在大型活动断裂带区域中,即 在中下地壳中上述活动块断裂带存在低速层。在上 地幔 85 km 深度处,本文划分的活动带中速度结构 无显著差异。

2.3 解的分辨率分析

为研究本文方法分析川滇地区三维地震波速度 结构解的分辨率,采用实验分析不同深度下解的分 辨率,实验结果如图 6 所示。

从图 6 中可以看出在 24 km 和 44 km 深度下, 解的分辨率较高,在 84km 深度下,解的分辨率较低,只有川滇地区内部解存在分辨率。从总体上来 看,本文方法解的分辨率较高。

3 结论

本文采用重力异常反演方法分析川滇地区的三



日本教教社学者自有主

维地震波速度结构,探析该地区深部构造背景和动 力作用环境,在重力反演方法中将重力异常数据和 面波频射数据相结合,进行联合反演,得到川滇地区 三维地震波横波速度模型。经过实验分析得到如下 结论:

(1)川滇地区在特定区域内显示出速度负异常特征,例如雪山、贡嘎山和峨眉山等高山和山体,同时部分山峰的负异常深度较深,达到上地幔和下地壳中,说明上述新生代造山带强烈构造正在出现隆升现象,与周围的岩石圈产生重力均衡作用。

(2)将大陆动力学和实验分析相结合,岩石圈的耦合作用主要与两个影响因素有关,一是力作用的状态或者是动力的来源,二是岩石圈所具有的流变结构。经过实验分析发现,在 24 km 深度处,上地壳中含有相对低速层,在 44 km 深度处,本文划分的活动带中速度负异常区占有较大比重,尤其是在大型活动断裂带区域中,即在中下地壳中上述活动块断裂带存在低速层,可将低速层当成是深部解耦的条件,或作为调节断块运动和断裂地接的手段。

参考文献(References)

- [1] 段晓亮,王一博,杨慧珠.基于逆散射理论的地震波速度正则化 反演[J].物理学报,2015,64(7):399-407.
 DUAN Xiaoliang, WANG Yibo, YANG Huizhu. Regularized Seismic Velocity Inversion Based on Inverse Scattering Theory [J].Acta Physica Sinica,2015,64(7):399-407.
- [2] 谷文彬,陈清礼,王余泉,等.饶阳凹陷虎 8 北潜山重力三维松 约束反演[J].石油地球物理勘探,2016,51(6):1219-1226
 GU Wenbin, CHEN Qingli, WANG Yuquan, et al. Partconstrained 3D Gravity Inversion for the Hubabei Buried Hill in Raoyang Sag[J].Oil Geophysical Prospecting,2016,51(6): 1219-1226.
- [3] 王静波,陈祖庆,蒋福友,等.频率域高分辨率地震波阻抗直接 反演方法研究[J].石油物探,2017,56(3):416-423.
 WANG Jingbo, CHEN Zuqing, JIANG Fuyou, et al. A Directinversion Method of High-resolution Seismic Impedance in Frequency Domain[J].Geophysical Prospecting for Petroleum, 2017,56(3):416-423.
- [4] XU Xiaoming, DING Zhifeng, YE Qingdong, et al. The Crustal and Upper Mantle Structure beneath the South-North Seismic Zone from the Inversion of Love Wave Phase Velocity[J].Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(11): 3928-3940.

- [5] 朱杰君,姜登峰,周文纳.基于深度加权的重力异常广义线性反 演成像方法及应用[J].科学技术与工程,2018,18(24):22-27. ZHU Jiejun, JIANG Dengfeng, ZHOU Wenna. The Imaging Method of Generalized Linear Inversion for Gravity Data and Its Application Based on Depth Weighting Function[J].Science Technology and engineering,2018,18(24):22-27.
- [6] 黎莎,刘春成,江玉乐.三维等效源反演成像研究及应用[J].煤 田地质与勘探,2015,43(5):90-94.

LI Sha,LIU Chuncheng,JIANG Yule.Application of 3D Equivalent Source Inversion and Imaging[J].Coal Geology & Exploration,2015,43(5);90-94.

[7] 欧阳明达,孙中苗,翟振和,等.采用重力异常的导纳理论推估 海底地形[J].测绘学报,2015,44(10):1092-1099.

OUYANG Mingda, SUN Zhongmiao, ZHAI Zhenhe, et al. Bathymetry Prediction Based on the Admittance Theory of Gravity Anomalies [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015,44(10):1092-1099.

[8] 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.

- [9] 王华忠,冯波,王雄文,等.地震波反演成像方法与技术核心问题分析[J].石油物探,2015,54(2):115-125,141.
 WANG Huazhong,FENG Bo,WANG Xiongwen, et al. Analysis of Seismic Inversion Imaging and Its Technical Core Issues
 [J].Geophysical Prospecting for Petroleum,2015,54(2):115-125,141.
- [10] 眭晓虹,张润宁,万晓云,等.基于卫星测高数据的海底地形反

演及分析[J].航天器工程,2017,26(3):130-136.

SUI Xiaohong, ZHANG Running, WAN Xiaoyun, et al. Bathymetry Prediction and Analysis Based on Satellite Altimetry Data[J].Spacecraft Engineering, 2017, 26(3):130-136.

- [11] 聂琳娟,超能芳,金海勇,等.卫星测高反演海洋重力异常的精度分析[J].测绘科学,2016,41(9):1-6,37.
 NIE Linjuan,CHAO Nengfang,JIN Taoyong, et al. Accuracy Analysis of Marine Gravity Anomaly Inferred by Satellite Altimetry Data[J].Science of Surveying and Mapping,2016,41 (9):1-6,37.
- [12] 李洋,张润宁.高度计测距精度对沿轨迹重力异常反演的影响
 [J].测绘学报,2015,44(4):363-369.
 LI Yang, ZHANG Running. Inference of Altimeter Accuracy on Along-track Gravity Anomaly Recovery[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(4):363-369.
- [13] GUO Z, CHEN Y, YIN W. Three-dimensional Crustal Model of Shanxi Graben from 3D Joint Inversion of Ambient Noise Surface Wave and Bouguer Gravity Anomalies [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015,58(3):821-831.
- [14] 王鑫,张景发,姜文亮,等.郑庐断裂带南段重力异常及不同深度的横向构造特征[J].地震地质,2016,38(2):370-385.
 WANG Xin, ZHANG Jingfa, JIANG Wenliang, et al. Transverse Structures Features of Different Depths Derived from Bouguer Gravity Anomalies in the Southern Segment of Tanlu Fault Zone[J].Seismology and Geology,2016,38(2):370-385.
- [15] 姜永涛,张永志,王帅,等.考虑沉积层重力改正的中国西部 Moho 面深度反演[J].地震研究,2015,38(2):257-261.
 JIANG Yongtao, ZHANG Yongzhi, WANG Shuai, et al. Inversion of Moho Depth in Western China Considering Gravity Correction of Deposition Layer[J]. Journal of Seismological Research,2015,38(2):257-261.