

文章编号: 1674-9057(2014)02-0254-06

doi: 10.3969/j.issn.1674-9057.2014.02.006

基于 Matlab 平台实现二维复杂地质模型多边形 网格建模及重力异常正演计算

王 芃^{1,2}, 张忠杰³, 张 晰³, 韩颜颜^{2,3}, 王敏玲^{2,3}, 梁晓峰³, 滕吉文³

(1. 中国科学院 广州地球化学研究所, 广州 510640; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘 要: 对已知地质模型进行重力异常正演计算是利用重力场数据对地下介质的密度异常信息进行解释的重要手段。针对三维复杂地质体的建模困难且不便, 而且多数三维线性地质体可以近似看作二维地质体以实现快速方便处理的情况, 对二维地质体进行多边形网格建模, 并利用 Matlab[®] 平台编写了适用于复杂二维地质模型的重力异常计算的软件系统。该软件系统对模型设定简单、运算速度快。选择华北地区的剖面使用目前业内广为使用的 IGMAS 正演软件和文中的软件系统进行了对比试验, 结果显示两种方法计算的重力异常结果相当。

关键词: 重力异常正演; 二维密度模型; 正演程序; Matlab[®] 平台

中图分类号: P631.1

文献标志码: A

作为地球物理学研究中的一个重要领域, 重力学是研究地球本体, 特别是地壳与上地幔结构与物性特征的主要方法之一。它主要通过在地表重力场的测量, 通过一定的正、反演方法来研究地下介质的结构和构造状态^[1-2]。布格重力异常是地下各层界面起伏及密度不均匀的综合反映, 重力解释是通过观测重力异常来了解地下的质量分布。重力解释的主要方法是正演拟合和反演。正演拟合是通过已知的质量分布来计算异常, 并逐步修正模型以实现重力异常的拟合。正演拟合有3个特点: 一是模拟性, 即解释总是在特定的模型范围内进行; 二是最优性, 即考虑了一切已有的先验信息; 三是针对性, 即致力于解释某种地质问题^[3]。通过重力异常来反演密度结构分布, 则由于场源分布的非唯一性和场分布的唯一性而具有多解性。因受重力数据数量的限制, 通过重力异常很难反演出精细的密度结构模型, 多数情况下为平滑的模型^[4]。因此, 正演拟合在重

力解释中还存在重要的意义。

实际地质体都是三维的, 正演计算也应基于三维模型, 而三维模型不仅正演的计算量很大, 而且三维建模异常复杂, 多数情况下处理成 2.5 维模型。实际工作中, 经常遇到线性地质体, 其走向方向尺度远大于垂直走向方向尺度。对于这类地质体, 可以建立沿走向方向无限延伸的二度体模型来计算它引起的异常, 这种模型能大幅降低建模的复杂性和计算量。

对于二维模型重力异常的计算, Hubbert 给出了曲线积分表达式^[5]。这些表达式有重要的理论意义, 但仍然难以计算截面为任意形状的二维模型的重力异常。针对这一问题, 地球物理学家们应用截面为多边形的二维模型来近似任意形状截面二度体进行正演, 并给出了相应的计算公式^[6-7]。

计算复杂二维模型重力异常的软件, 如 IGMAS, 对多边形模型的数量与可调整密度的数量有

收稿日期: 2013-12-23

基金项目: 国家深部探测技术与实验研究专项 (SinoProbe-03-02); 国家自然科学基金项目 (41274090)

作者简介: 王 芃 (1985—), 男, 博士研究生, 研究方向: 重力异常正演拟合研究, stonite@126.com。

引文格式: 王芃, 张忠杰, 张晰, 等. 基于 Matlab 平台实现二维复杂地质模型多边形网格建模及重力异常正演计算 [J]. 桂林理工大学学报, 2014, 34 (2): 254-259.

限制并且基于 linux 平台,具有一定的局限性。针对这种情况,笔者根据前人推导的重力异常计算公式,使用 Matlab[®]平台编写了简便的软件系统来实现二维复杂地质模型重力异常的计算,并建立相同模型与 IGMAS 进行了对比。

Matlab[®]是国际公认的标准计算软件,有强大的数值计算及可视化功能,是当今最优秀的科技应用软件之一,具有强大的科学计算能力、可视化功能、开放式可扩展环境,所附带的工具箱支持 30 多个领域的计算、仿真等应用,因此在许多科学领域中,Matlab[®]成为计算机辅助设计和分析、算法研究及其应用开发的基本工具和首选平台。同时,Matlab[®]具有其他高级语言难以比拟的一些优点,即 M 文件编写简单、效率高、易学易懂,在信号处理、通信、自动控制及科学计算等领域中被广泛应用,特别是在矩阵运算、数组处理等方面具有很大的优势,是工程师、科研工作者最易上手的编程语言、最好的工具和环境^[8]。因此,笔者选择 Matlab[®]平台开发重力异常的正演模拟。

1 多边形网格建模

1.1 多边形网格结构

如图 1 所示,根据先验信息,将剖面划分为若干多边形网格,每个网格包含若干节点,在一个网格中,各节点按顺时针方向排列。将节点与多边形的信息输入作为模型,模型数据格式见表 1。模型参数包括节点与多边形信息两部分,其中 $v_i(i = 1, 2, \dots, n)$ 为各节点的序号; x_i 与 $z_i(i = 1, 2, \dots, n)$ 为节点 v_i 的横坐标与纵坐标; $b_i(i = 1, 2, \dots, n)$ 为多边形网格的序号; $vn_i(i = 1, 2, \dots, n)$ 为多边形 b_i 所包含的节点个数; $\rho_i(i = 1, 2, \dots, n)$ 为多边形 b_i 的密度; $b_1v_1, b_1v_2, \dots, b_1v_{n-1}, b_1v_n$ 为多边形 b_1 使用

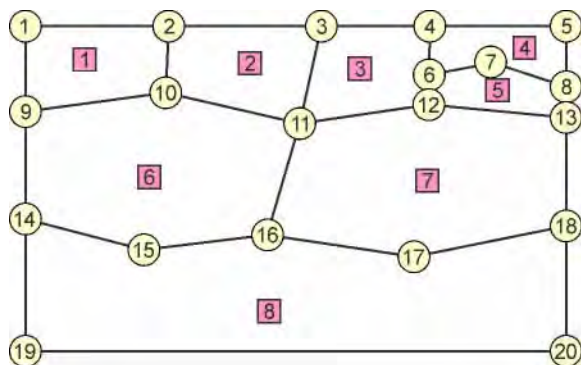


图 1 多边形网格模型划分示意图

Fig. 1 Sketch map of polygonal division of a model

表 1 模型数据格式

Table 1 Data structure of a model

节 点	v_1	x_1	z_1
	v_2	x_2	z_2

	v_i	x_i	z_i

多 边 形	v_n	x_n	z_n
	b_1	vn_1	ρ_1
		$b_1v_1, b_1v_2, \dots, b_1v_{n-1}, b_1v_n$	
	b_2	vn_2	ρ_2
		$b_2v_1, b_2v_2, \dots, b_2v_{n-1}, b_2v_n$	

	b_i	vn_i	ρ_i
		$b_iv_1, b_iv_2, \dots, b_iv_{n-1}, b_iv_n$	

	b_n	vn_n	ρ_n
		$b_nv_1, b_nv_2, \dots, b_nv_{n-1}, b_nv_n$	

的节点序号,以顺时针方向排列, $b_1v_1, b_1v_2, \dots, b_1v_{n-1}, b_1v_n$ 均对应节点 v_1 至 v_n 中的某一点。

1.2 叠加式密度层与背景场信息的分层设定

布格重力异常是地质体的剩余密度引起的,剩余密度是岩石实际密度与参考模型密度的差值。由于重力场具有可叠加性,因此定义两层多边形模型来分别表示岩石实际密度与参考模型密度。岩石实际密度模型的重力异常与参考模型的重力异常的差值即为布格重力异常。分层定义有两个优点: 岩石实际密度模型使用全密度而非剩余密度,较为直观,便于调整; 由于参考模型也由多边形组成,因此也可以进行分块定义,每块可以有不同的密度与不规则的界面,例如把参考模型分为上地壳、中地壳、下地壳与上地幔 4 部分,而不必使用统一的参考密度。这样的参考模型可以更好的反映实际情况。

2 重力异常正演计算

二维重力异常正演计算的核心在于计算多边形棱柱体在一点引起重力异常。贾真等详细讨论了多边形截面二度体重力异常计算公式中所包含的数值不稳定性^[9],并基于格林公式给出了均匀二度体重力异常线积分表达式的严格数学推导过程,且其提出的计算方法适用于包括场源内部以及边界上的任意空间位置。本文即在其提出的均

匀多边形截面二度体重力异常计算公式^[9]的基础上,对所构建的多边形网格密度异常模型进行地表重力异常的程序计算。

2.1 二度体重力异常计算公式

任意形状的截面二度体的重力异常难以计算,如果利用多边形来逼近具有任意形状的截面 S ,只要边数足够多,就可以取得较好的近似效果,并且计算也较为简单(图2)。

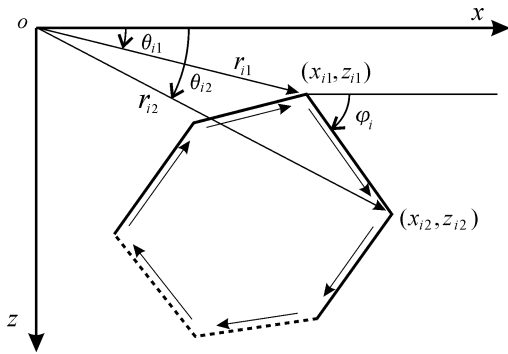


图2 多边形截面二度体 (多边形内箭头代表积分路径方向)
Fig. 2 A prism of polygonal section (Arrows inside the polygonal line indicating the integration path)

均匀多边形截面二度体在 $x - z$ 坐标系原点处所产生重力异常的计算公式为^[9]:

$$\Delta g(0, 0) = 2G\rho \sum_{i=1}^N r_{i1} (\sin \theta_{i1} \cos \varphi_i - \cos \theta_{i1} \sin \varphi_i) \times \left(\sin \varphi_i \ln \frac{r_{i1}}{r_{i2}} + \Delta \theta_i \cos \varphi_i \right), \quad (1a)$$

其中,

$$\sin \varphi_i = \frac{y_{i2} - y_{i1}}{\sqrt{(x_{i2} - x_{i1})^2 + (y_{i2} - y_{i1})^2}},$$

$$\cos \varphi_i = \frac{x_{i2} - x_{i1}}{\sqrt{(x_{i2} - x_{i1})^2 + (y_{i2} - y_{i1})^2}}. \quad (1b)$$

若要获得沿某一观测线上的重力异常,则可以通过改变坐标系的原点位置来实现。

2.2 多边形网格密度模型重力场的计算

因为重力场具有可叠加性,所以在上述公式的基础上,可以计算一系列均匀多边形截面二度体在一系列离散的点上所产生的重力异常。

通过观察式(1a),对同一多边形而言,其在观测点 o 所引起的重力异常可以表示为 $\Delta g = \rho \times c$,将 c 称为形体参数 c 的值仅与观测点 o 的位置有关。因此对于一系列的观测点 o_1, o_2, \dots, o_n ,有一系列对应的形体参数 c_1, c_2, \dots, c_n ,进而可以计算出各

点的重力异常 g_1, g_2, \dots, g_n 。设观测点 o_1, o_2, \dots, o_n 的横坐标分别为 x_1, x_2, \dots, x_n ,则点 $(x_1, g_1), (x_2, g_2), \dots, (x_n, g_n)$ 的连线即为该多边形在测线上引起的重力异常曲线。将模型中所有多边形对应的重力异常曲线叠加,即可得到模型在测线上引起的重力异常曲线。

在 Matlab[®] 编程实现中,即使用上述原理。设模型中有 M 个多边形,测线上有 N 个测点,进行双重循环计算模型在测线上引起的重力异常曲线。外循环从 1 至 M 经历所有多边形,内循环从 1 至 N 经历所有测点。把第 m 个多边形对于第 n 个测点的形体参数 $c_{(m,n)}$ 写于形体参数矩阵 C 的 m 行 n 列,将各多变形的密度写成长度为 M 的密度向量 D 。密度向量 D 与形体参数矩阵 C 相乘的结果向量 G 即为模型在各观测点引起的重力异常。

在上述计算中,模型以外部分的密度为 0,其在各点引起的重力异常也均为 0,因此在模型的边缘部分,重力异常曲线会剧烈向 0 方向偏移,导致数值出现偏差(图3)。为了消除这种偏差,程序会对模型进行检查,找出位于左右边缘的多边形,记录其在边缘的厚度,并以此厚度向模型之外延伸指定的长度,形成一个矩形,密度与其所对应的多边形相同。程序将计算所有边缘矩形在测线上引起的异常曲线,并把此曲线叠加至模型引起的重力异常曲线上(图3)。在正演拟合过程中,对模型的调整包括结构与密度两部分。在程序中对模型的调整仅需要对模型数据中的相应参数进行调整即可。

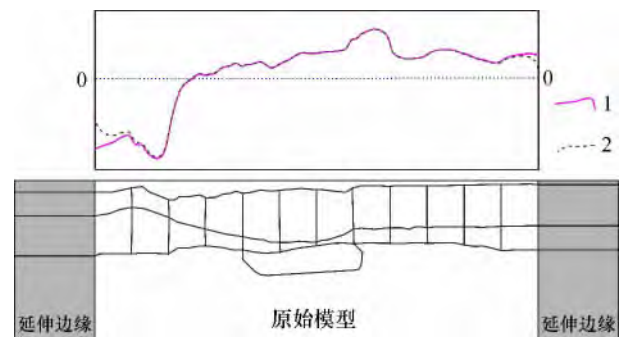


图3 模型边缘处理示意图
Fig. 3 Sketch map of processing margin of a model
1—无边延伸时的异常曲线; 2—有边缘延伸时的异常曲线

3 模型试验

为了验证本文所提出的重力异常正演计算软件系统的准确性,选择华北地区的密度结构,通

过应用本程序和目前业内广为使用的 IGMAS 软件对该地区剖面模型重力异常进行正演计算, 并对二者的计算结果进行比较。

华北克拉通形成于太古代, 经历了元古代和古生代的稳定时期后, 中生代时东部重新开始出现构造活动, 现在研究认为华北克拉通发生了岩石圈减薄。由于具有复杂的构造历史, 华北克拉通吸引了众多学者的关注。为了探究华北克拉通岩石圈减薄的地球动力学过程与岩石圈强度横向变化间的可能联系, Zhang 等选择图 4 所示的剖面进行了综合地球物理研究^[10-11]。本文以 Zhang 等所提出的密度结构为基础, 制作适用于 IGMAS 和本文程序的模型, 对 IGMAS 所用模型进行了上文所述的边界延伸处理, 然后分别计算其产生的重力异常场, 结果如图 5 ~ 图 7。

图 5 和图 6 为两种方法使用的模型及计算的曲线, 图 7 为二者曲线的对比, IGMAS 所计算的

曲线由于其程序的原因仅有 50 个数据点, 点距约 33 km; 而本文程序所计算的曲线采用了 1 km 的点间距, 共有数据点 1 661 个。为与 IGMAS 计算结果对比, 本程序计算的曲线进行重新采样, 得到与 IGMAS 对应的数据点。从图 5 ~ 图 7 可以看出, 本程序计算结果与 IGMAS 计算的结果高度一致, 绝大部分数据点的误差在 1 mGal 之内, 可能是计算过程中精度损失累积的结果。说明在二维复杂地质模型重力异常正演计算中, 本程序能得到与 IGMAS 相同的结果。另外需要说明的是, Zhang 等文中所用模型为有限延伸模型, 而本文所用的模型均为无限延伸模型, 因此本文中计算的曲线与 Zhang 等文中的曲线形状类似而范围不同。

4 结 论

针对三维建模的困难及巨大计算量, 笔者编写了一套基于 Matlab[®] 平台的软件系统, 用以实现

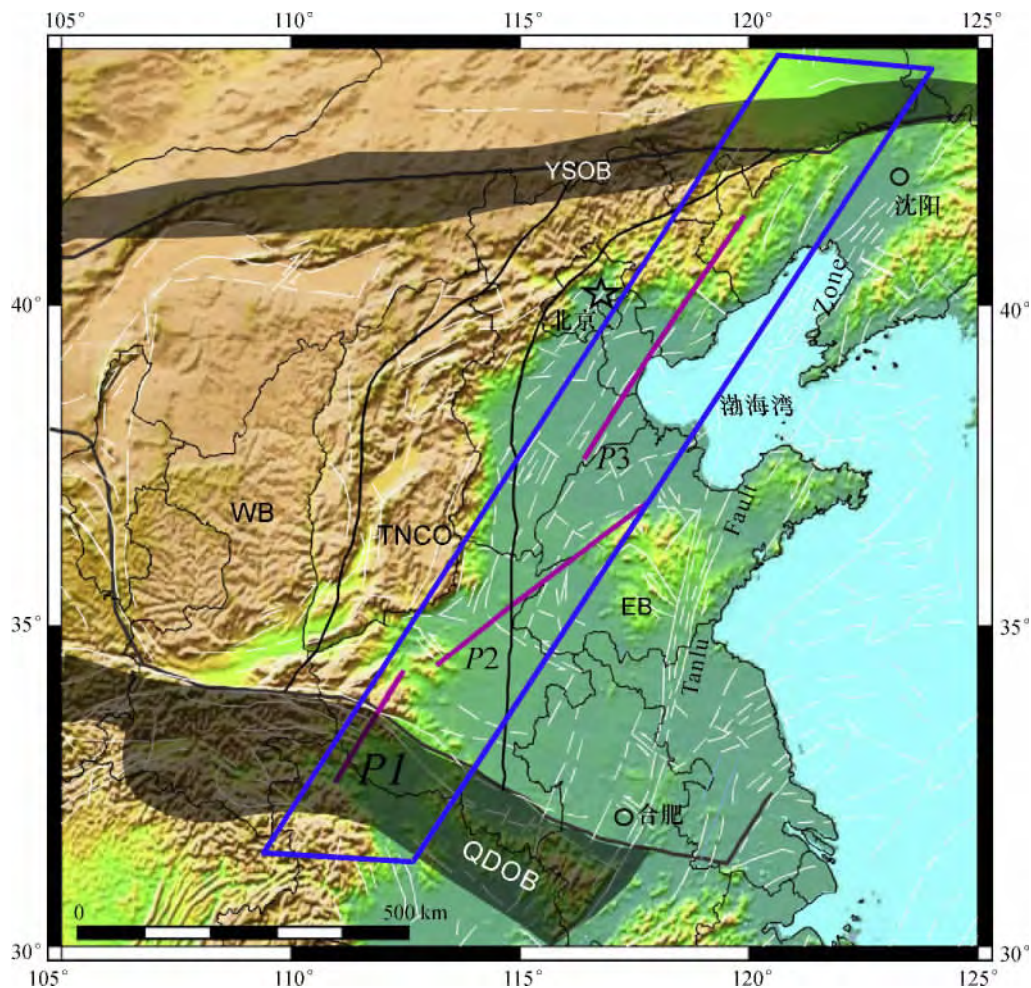


图 4 华北地区测线位置图 (P1, P2 和 P3 为测线的 3 部分) (据 Zhang 等^[10])

Fig. 4 Position of profile in north China (P1, P2 and P3 representing three segments of the profile)

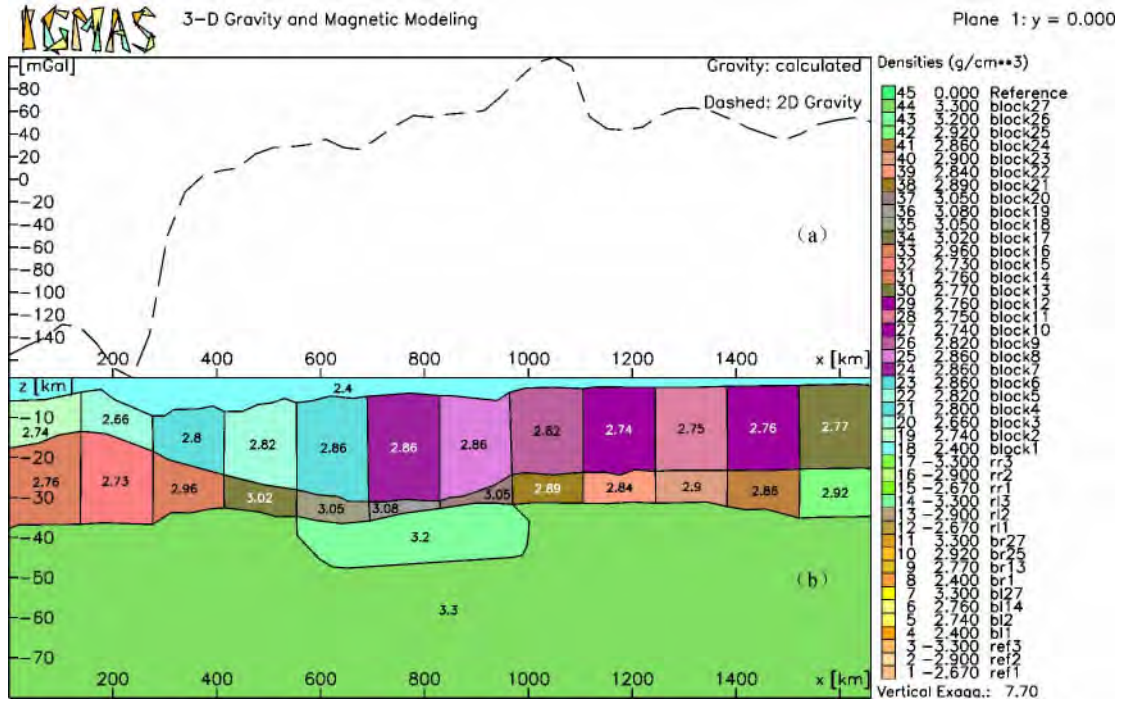


图5 华北克拉通东部的地壳密度结构及 IGMAS 计算的重力异常

Fig. 5 Crustal density structure of eastern North China Craton and gravity anomaly calculated by IGMAS

a—IGMAS 软件计算的重力异常结果; b—Zhang 等^[10] 提出的华北克拉通东部的地壳密度结构, 各色块中的数值代表密度 (g/cm^3)

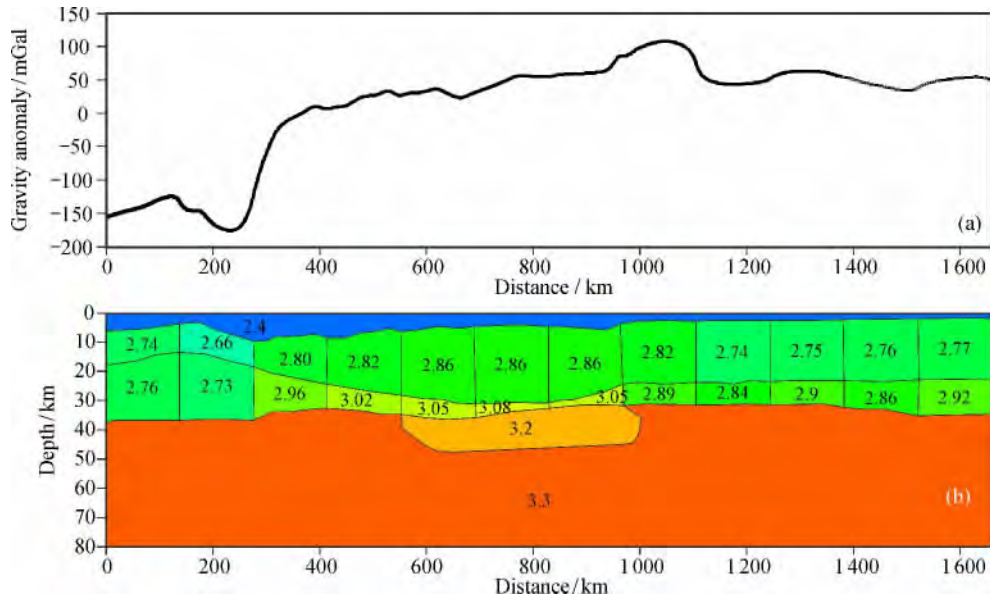


图6 华北克拉通东部的地壳密度结构及本程序计算的重力异常

Fig. 6 Crustal density structure of eastern North China Craton and gravity anomaly calculated by the program in this paper

a—用本程序计算的重力异常结果; b—Zhang 等^[10] 提出的华北克拉通东部的地壳密度结构, 各色块中的数值代表密度 (g/cm^3)

二维复杂地质模型重力异常正演计算。该软件系统基于多边形网格构建地下介质密度模型, 要求的数据结构简单; 通过叠加式密度图层的构建提高了模型的直观易读性; 并通过背景场信息的分层设定, 提高了拟合结果的合理性。该软件便于

调整, 在计算过程中不涉及积分, 运算速度快。通过应用本软件和 IGMAS 软件对华北地区地质模型重力异常的正演计算, 表明二者的计算结果高度一致, 证明了本程序的可靠性。

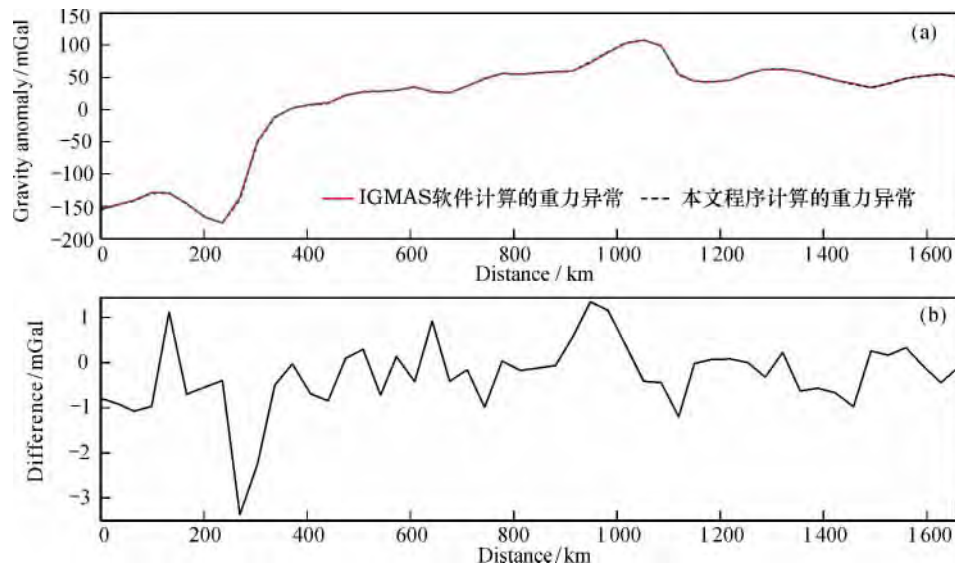


图7 曲线对比

Fig. 7 Comparison of curves

参考文献:

- [1] 王谦身, 安玉林, 张赤军, 等. 重力学 [M]. 北京: 地震出版社, 2003.
- [2] 腾吉文, 张中杰, 白武明, 等. 岩石圈物理学 [M]. 北京: 科学出版社, 2004: 1-990.
- [3] 郭武林. 重力勘探及其推断解释 [N]. 中国地质报, [1984-02-27] (3).
- [4] Li Y G, Oldenburg D W. 3-D inversion of gravity data [J]. *Geophysics*, 1998, 63 (1): 109-119.
- [5] Hubbert M. A line-integral method of computing the gravimetric effects of two-dimensional masses [J]. *Geophysics*, 1948, 13 (2): 215-225.
- [6] Talwani M, Worzel J L, Landisman M L. Rapid gravity computations for two-dimensional bodies with application to the Mendocino submarine fracture zone [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1959, 64 (1): 49-59.
- [7] Won I J, Bevis M. Computing the gravitational and magnetic anomalies due to a polygon: Algorithms and Fortran subroutines [J]. *Geophysics*, 1987, 52 (2): 232-238.
- [8] 王生林, 李凤廷, 梁晰, 等. MATLAB在重力基点网平差中的应用 [J]. *物探化探计算技术*, 2013, 35(5): 550-554.
- [9] 贾真, 孟令顺. 均匀多边形截面二度体重力异常计算公式的改进 [J]. *地球物理学进展*, 2009, 24(2): 462-467.
- [10] Zhang Z J, Wu J, Deng Y F, et al. Lateral variation of the strength of lithosphere across the eastern North China Craton: New constraints on lithospheric disruption [J]. *Gondwana Research*, 2012, 22: 1047-1059.
- [11] Zhang Z J, Teng J W, Romanelli F, et al. Geophysical constraints on the link between cratonization and orogeny: evidence from the Tibetan Plateau and the North China Craton [J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 130: 1-48.

Polygonal grid modeling of 2-D complex geological model and calculation of gravity anomaly on Matlab platform

WANG Peng^{1,2}, ZHANG Zhong-jie³, ZHANG Xi³, HAN Yan-yan^{2,3},
WANG Min-ling^{2,3}, LIANG Xiao-feng³, TENG Ji-wen³

(1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; 3. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100029, China)

Abstract: Calculation of gravity anomaly from known geological model is an important method to interpret abnormal density of medium by using gravity data. Modeling of 3-D geological body is difficult and inconvenient, and many 3-D linear geological bodies can be processed conveniently and fast as 2-D geological bodies. This paper built polygonal grid model of 2-D geological bodies and compiled software on Matlab[®] platform to realize the calculation of gravity anomaly from complex 2-D model. The structure of the model is simple and the software executes fast. A comparative test with widely used calculation program IGMAS and the software in this paper is carried out using a profile in North China. The results show that the gravity anomalies calculated by the two softwares are almost identical.

Key words: calculation of gravity anomaly; 2-d density model; forward modeling program; Matlab[®] platform