

晋东北及邻区重力三维正、 反演的初步结果

刘光夏¹⁾ 赵文俊²⁾
任文菊¹⁾ 吴岫云¹⁾

摘 要

本文根据地质和区域重力资料,利用重力三维正、反演方法研究得到了晋东北地区地壳深部构造。通过三维正演,得到了不同深度的剩余重力异常;用一个已知的莫霍界面的深度值,反演出了全区地壳厚度的平面分布。在此基础上,对一些活动断裂和构造的深度以及地震和第四纪火山活动的地壳深部构造背景进行了探讨。研究还发现,沿北纬40°线可能存在一条深部剪切构造带。

一、研究区范围、地质概况及布格重力异常分布

研究区范围西起大同、繁峙,东到宣化、望都,即北纬40.7°—38.6°,东经113.2°—115.2°。怀来—西安裂谷系北端也包括在内。

太古界及下元古界的深变质岩系组成了研究区的结晶基底;中、上元古界、古生界和中、新生界组成盖层。山脉和盆地的走向为北东东和北东向。在新第三纪和第四纪,该区发生了大规模的构造运动,一系列断陷盆地在古老基底上沿着北东东和北东方向呈左行雁式排列,地震和新生代的火山活动都分布在盆地之中。

全区布格异常皆为负值。由东南隅完县一带的 $-10 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 向西北递减至大同、阳高地区的 $-135 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。这种区域性变化反映了莫氏面起伏总的趋势。布格重力等值线的走向大致以北纬40°稍偏南的浑源、广灵、蔚县、小五台山一线为界分南北两部分。

(1) 北部主要为东西走向。基本格架由大同以南重力低、阳高天镇重力低和阳原以北重力高组成。等值线均呈长垣状或短轴椭圆状,走向近东西。桑干河地堑和阳高地堑¹⁾为两个重力低,异常值达 $-135 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。大同南和大同、阳原一带的重力等值线梯度较大。阳原以北至大同一带的上新世到更新世的玄武岩分布区为重力高区,异常值为 -105 至 $-100 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。大同以北有北北东走向的重力梯度带,是晋北云岗—平鲁重力高的北半部。怀安和宣化之间,异常等值线呈北西走向,异常值升至 -105 到 $-85 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。上述两处插入了东西走向的布格重力异常高值带,这可能反映了该区的深部背景。

1) 国家地震局地球物理勘探大队

2) 海南省地震局

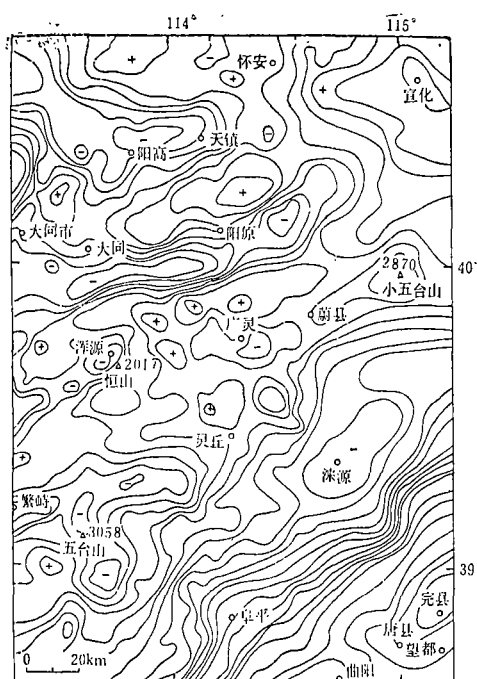


图1 晋东北及邻区布格重力异常图

(根据山西省地矿局物探队, 1988)

Fig. 1 Gravity anomaly of north-eastern Shanxi Province and its vicinity

度的频谱成分是很复杂的, 不仅范围大, 低频成分丰富, 而且有大量的高频成分混迹其间。对此, 用任何单一通频带的滤波方法都难以把布格异常中的浅部和深部信息分开。为了解决这个问题, 我们采用了一种新的“剥皮”方法。正演计算时选用了精度较高的 Караев 三维模型^[1]。计算的步骤如下:

1. 建立浅层地质体的密度模型

按不同时代不同密度的地层和岩浆岩及其出露或隐伏情况, 分别编出可供数字化采样的等厚度和等深度图27幅。为节省篇幅, 现仅列出第四系厚度图(图2)。采样间距为2.5×2.5公里, 累计处理数据27.5万个。密度值采用山西、河北两省物探队的实测数据。对具有复杂岩性的地层单位, 则根据文献[2]、[3]所提供的典型剖面经过加权计算求得。主要地层及岩浆的密度见表1。

2. 进行重力三维正演计算

计算出每一密度层的重力值, 并将其从布格异常中减去, 得出该层以下的剩余重力异常。依此类推, 一直计算到研究区内最老的一层, 即太古界, 得出深部剩余重力异常。分析不同层次的剩余重力异常等值线的平面变化, 探求主要地震构造带或断裂带由浅而深的变化规律。

3. 反演地壳厚度

选用物探大队太原—宣化人工地震测深剖面上的大营村测点的地壳厚度值(44公里)为

(2) 南部重力等值线主要为北东到北北东走向, 大致可包括三部分: 反映太古界结晶基底(浑源)和滹沱河地堑(繁峙)的重力低, 幅值为 -120 到 $135 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$; 五台山、恒山、广灵和灵丘一带的重力低背景上出现局部重力高和重力低异常, 异常值为 -130 到 $-100 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$, 反映了燕山期酸性、中酸性及超基性侵入岩体的分布; 研究区东南部阜平、涞源、小五台山一线以南, 布格异常稳定, 幅值由 $-100 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 稳步升至 $-10 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。局部的涞源重力低反映了阜平穹隆(马杏垣等, 1963)和燕山期花岗岩体的分布(图1)。

二、三维正、反演方法 及反演结果

研究区内出露的前寒武纪的变质杂岩、古生代沉积岩和煤系地层以及中、新生代的沉积岩和基性火山岩等, 它们不仅反映了地质构造史, 也说明了地表和地壳浅层介质密

1) 山西省地质局, 山西省地质图(1:50万), 1974.

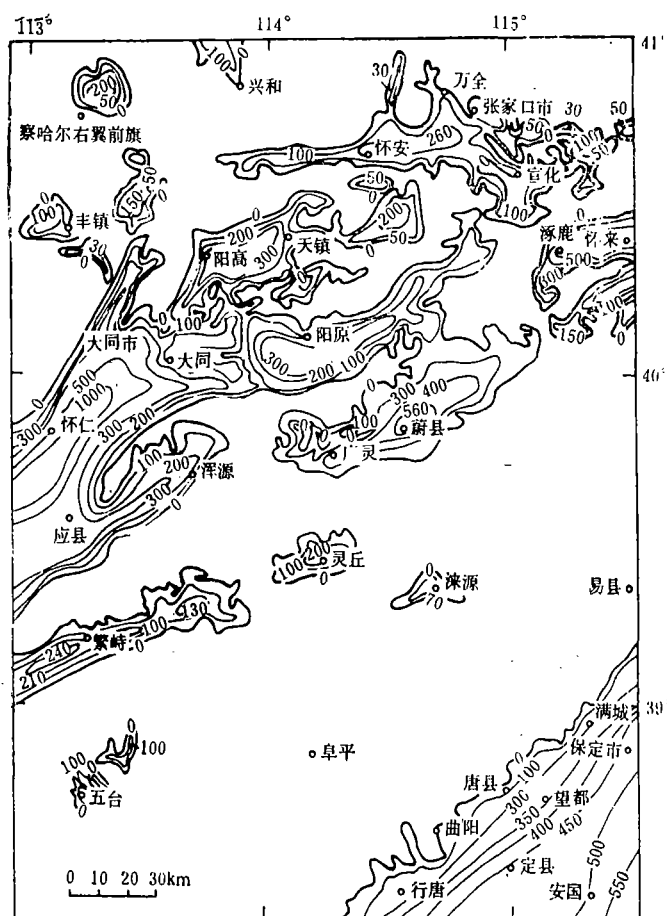


图 2 晋东北及邻区第四系等厚度图 (单位: 米)

Fig. 2 Quaternary system isopach of north-eastern Shanxi Province and its vicinity

表 1 地层和岩浆的密度值 (公斤/米³)

地 层	密 度	地 层	密 度	地 层	密 度	岩 浆 岩	密 度
第四系	1980	侏罗系	2520	中、上元古界	2710	花岗岩	2600
上第三系	2150	石炭二叠系	2600	下元古界	2680	闪长岩	2760
下第三系	2230	奥陶系	2680	中太古界	2730	玄武岩	2720
白垩系	2430	寒武系	2660	下太古界	2700	超基性岩	3060

控制点²反演全区的地壳厚度。反演计算采用了正演计算结果, 即逐步逼近拟合正演 剩余异常曲面的多次迭代方法, 给出最佳地壳厚度分布。在计算中用残差值修改反演界面各点深度时, 使控制点的深度始终保持给定的数值。

(1) 消除第四系、上第三系、中生界重力值对布格异常的影响(下称“剥去”), 结果见图 3 a。由图可看出, 剥去第四系及第三系后, 研究区北部和南部西侧的布格重力值普遍增加到 $5 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。大同、阳高两个重力低皆以 $-130 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 线为中心。阳原重力高

不变。大同市北出现 $-100 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 重力高圈闭线。怀安、宣化的北西向等值线不变。当剥去中生界后(图3b), $-100 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 等值线开始向南西扩展到蔚、广地区。五台山、灵丘、广灵一带, 原在布格异常重力低背景上的局部重力高和重力低, 在新生界、中生界以下被简化成一个向南西突出的宽缓的鼻状构造。而广灵一带, $-110 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 等值线则圈闭成了一个北西走向的椭圆。五台山、恒山地区, 以 -120 和 $-130 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 等值线自成重力低体系。南部东侧的太行山重力梯度带不变。

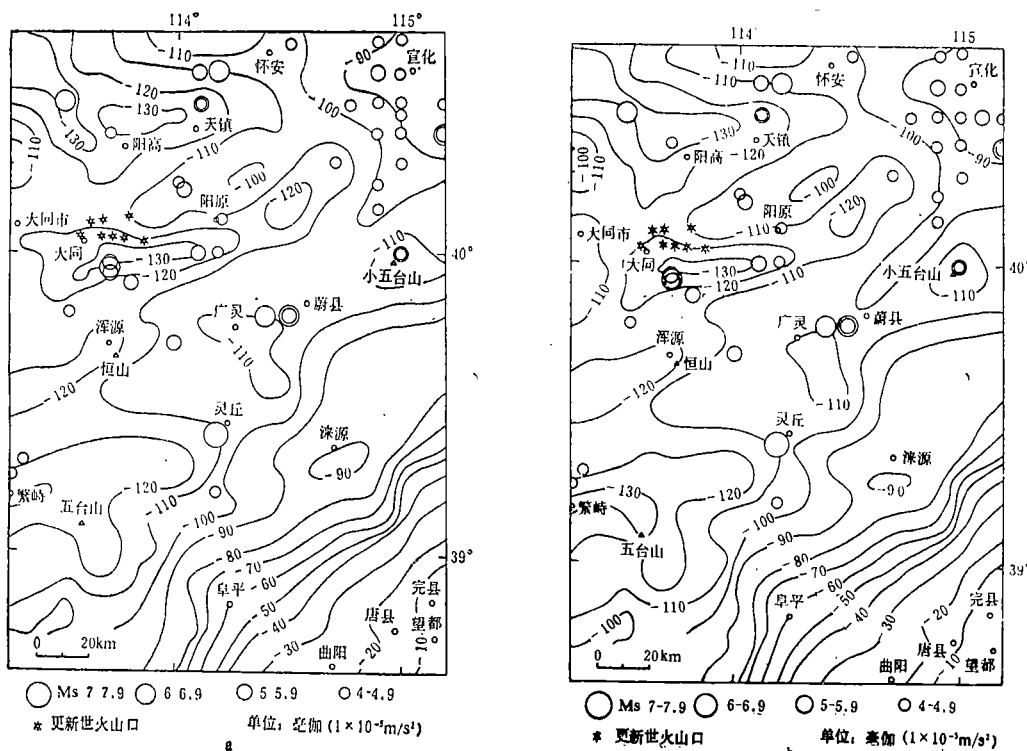


图3 剩余重力异常图

a. 第四系及上第三系以下 b. 中生界以下

Fig.3 Residual gravity anomaly of north-eastern Shanxi Province and its vicinity

(2) 剥去古生界后, 北部重力低仍以大同、阳高和阳高西为中心, 幅值为 $-130 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$; 重力高以阳原 ($-100 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$)、怀安西 ($-110 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$) 和宣化 ($-80 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$) 为中心, 走向东西。大同市出现了以 $-90 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 为中心的北北东向重力高; 怀安、宣化之间则出现北西走向的重力陡变带, 其中 $-100 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 等值线经北纬 40° 折向蔚县、广灵并显示出了盆地基底轮廓。五台山重力低仍自成体系。太行山梯度带无变化。东南隅河北平原望都一带剩余重力升至 $+10 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ (图4a)。元古、太古界之下, 等值线的形态和量值与图4a差别不大(图4b、c)。至此正演剥皮所达到的深度大致相当于地壳的中、下层。

(3) 消除太古界底面到莫霍面之间的重力值。根据 Woollard (1965年) 的资料, 我们

*震中位置据孟宪东, 1988.

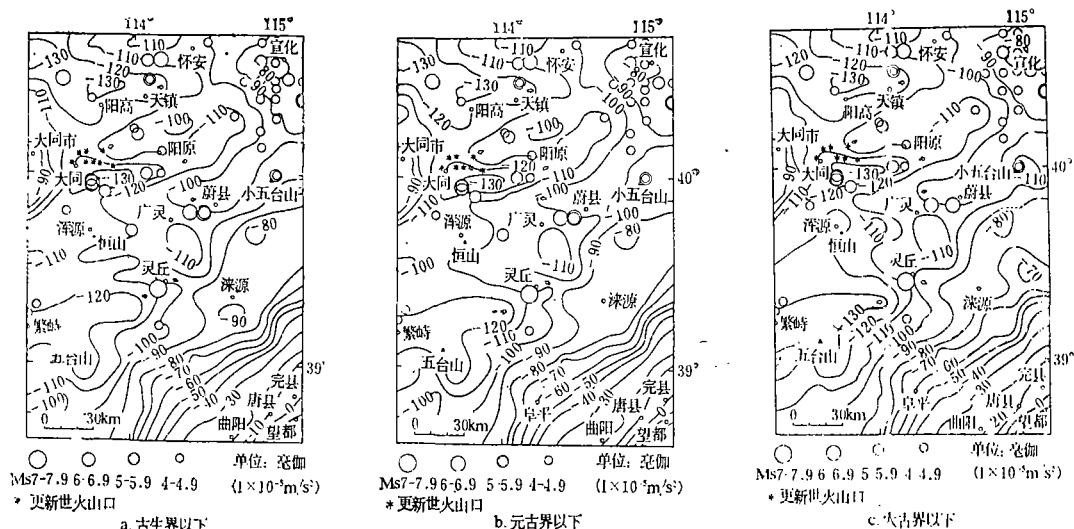


图4 剩余重力异常(图中箭头表示深部剪切带)

Fig. 4 Residual gravity anomaly of north-eastern Shanxi Province and its vicinity

把这一层的密度定为 2750kg/m^3 。图5为研究区深部剩余重力异常图。由图5可见,全区重力异常值增加 $10 \cdot 10^{-5}\text{m/s}^2$ 。除太行山外,北部大同、阳高两个重力低的 $-120 \cdot 10^{-5}\text{m/s}^2$

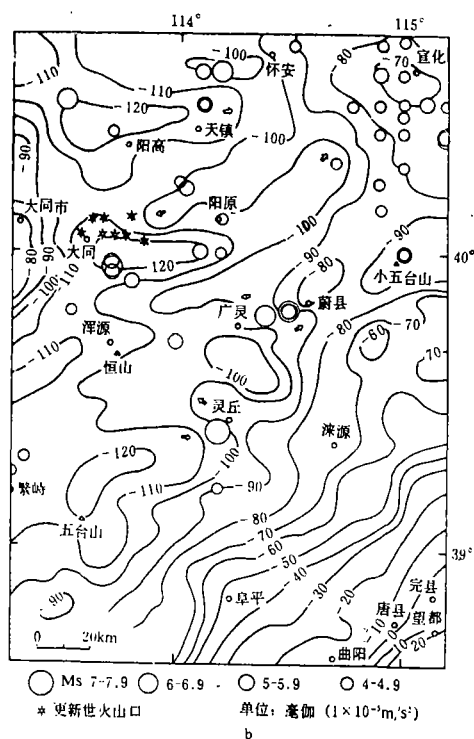


图5 深部剩余重力异常图

Fig. 5 Deep residual gravity anomaly of north-eastern Shanxi Province and its vicinity

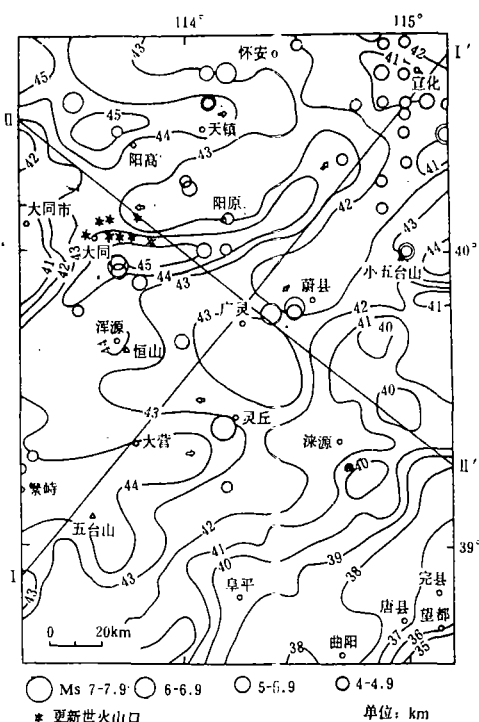


图6 地壳厚度图

Fig. 6 Crust thickness of north-eastern Shanxi Province and its vicinity

等值线圈闭。阳原重力高为 $-100 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。大同市以南深部剩余重力高达 $-80 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ ，为东经 114° 以西的最高值，并与阳原构成一个不规则的“马鞍形”。宣化重力值升至 $-70 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。 -80 和 -90 等值线仍为北西走向。蔚县出现一个北东走向 $-80 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 的局部重力高。 -90 、 -100 和 $-110 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 三条等值线在蔚、广、灵以及五台山、恒山地区形成几个有规律的弯曲。值得注意的是，广灵北西向圈闭区重力值由 $-110 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 升至 $-100 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。也就是说，蔚、广盆地基底介质的密度在深部出现了差异。五台山区 $-120 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 等值线呈“肾状圈闭”，是南部地区的最低值。太行山重力值从 -90 到 $+20 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 依次递增，保持稳定。深部剩余重力异常大致反映地壳下层的介质质量的三维状态。

我们根据宣化—太原人工地震测深剖面上大营村炮点的地壳厚度（44 公里）³⁾，反演出全区的地壳厚度（图 6）。由图 6 可以看出地壳厚度由东南部的 35.5 公里向西部递增至 45 公里，同上述布格重力异常的分析完全一致。北纬 40° 附近是地壳厚度的一个变异带。其北部地壳厚度为 41—44 公里，南部为 35—44 公里。为了验证重力反演结果的可靠性，我们利用两条斜贯研究区的人工地震测深剖面 I—I' 和 II—II' ⁴⁾ 进行了对比，除个别地段外，大部分符合较好（图 7）。据此，我们得出研究区地壳构造的初步结果（表 2）。

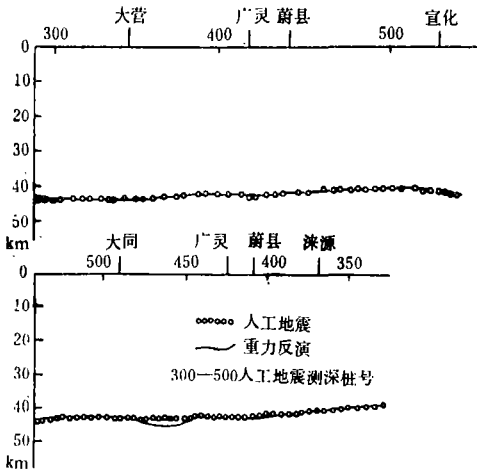


图 7 重力反演地壳厚度与人工地震结果对比

Fig.7 A comparison between crust thickness of gravity inversion and observation results of artificial earthquake

表 2 地壳构造一览表

地壳构造					
凹陷区	地壳厚度 (km)	隆起区	地壳厚度 (km)	斜坡区	地壳厚度 (km)
大同	45	大同市	41	阜平—涞源	40
阳高	45	阳原	43		
小五台	44	宣化	41		
浑源	44	广灵	43		
五台山	44	涞源北	40		

三、深部地质构造讨论

1. 一些断裂和构造的深度

桑干河地堑两侧断裂、天镇—阳高一丰镇断裂、代县—灵丘断裂为达到莫霍面的深断

4) 国家地震局地球物理勘探大队，京津唐地震预报试验场地壳深部探测研究工程成果，1987。
8) 刘昌铨、杜官恒，1988。

裂。它们在布格重力异常图上表现为重力梯度带,在深部剩余异常图(图5)上依然存在。特别是桑干河地堑两侧断裂深度可能达到上地幔。地壳厚度图(图6)上也反映了它们的存在。这与文献[4]的研究结果是一致的。大同市口泉断裂在布格异常图上反映为很强的重力梯度带。在中生界以下的剩余重力异常图(图3b)上反映就不明显了,代之以穹隆状的剩余重力高异常。该重力高在元古、太古界之下和深部剩余异常图上一一直清晰可辨。这可能说明口泉断裂切割地壳并不深,但其底部有重物质上涌。另外从图5可看出,怀安、宣化都可能有北西走向深及下地壳的断裂。蔚广盆地的基底轮廓在古生界以下的剩余重力异常图上才显示出来(图4b、c),说明盆地根基是很深的。灵丘、广灵和五台山地表有众多北西向断裂[5]和岩脉、岩体[1],在太古界之下,广灵出现 $-110 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 等值线的北西向椭圆圈闭区及五台山区 $-130 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 等值线构成的重力低,同人工地震测深发现的低速层有较好的对应[4]。东南隅阜平、涞源一带的北东走向的太行山重力梯度带在正演计算中始终保持不变。

2. 深部纬向构造带和深部剪切带

根据图3至图5所反映的地壳介质由浅而深的质量变异,我们认为北纬 40° 附近可能存在一条深部纬向构造带。根据图3b到图5的等值线弯曲情况来推测,沿该纬向带可能存在如箭头所示的水平剪切滑动。在地质上常运用河流的同步弯曲现象来推测断层的现代水平运动方向[6],同理,代表地壳质量差异的重力等值线的同步弯曲,也表明了地下介质沿某一剪切面存在着相对运动[7][8]。

3. 深部剩余重力高和重力低

从图4c和图5可以看出,研究区内共有六处深部剩余重力高和三处重力低,即大同市、广灵至灵丘间、蔚县、宣化、怀安和涞源北的重力高及阳原以北、大同以东和五台山地区的重力低。它们的相对幅值变化不大,但等值线圈闭,形态完整。在上述深部构造的背景下,我们把研究区内的盆地进一步划分为三种类型:第一类以幔源重物质的上涌为背景,如大同市(属于云岗—平鲁上地幔隆起区)。第二类以轻物质为深部背景,如大同市、阳高北、桑干河和滹沱河等四个盆地的负异常值一直是全区最低的。人工地震探测发现在12—23公里深度,负速度梯度现象明显(纵波速度 $6.2-5.9 \text{ km/s}$)[9]。第三类盆地位于深部剩余重力高和重力低的过渡地带。也就是说,盆地地壳深部存在较强的介质密度差异。如蔚县—广灵、大同一阳原、灵丘等盆地,这正是第四纪火山活动区和破坏性地震容易发生的地区。

如果说人工地震发现了研究区内地壳速度结构在剖面上的差异,本文则指出了这些差异所代表的质量异常的大致的平面展布。那么,我们是否可以进一步推测,在幔源物质周围,可能存在垂向切变,也可以引起重力扩展或较深层次的重力滑动构造。当然,地壳深部的剪切滑动还受更大范围的构造力驱动。总之,在寻找潜在震源区或进行地震危险区划的时候,三维重力正、反演得出的深部质量差异以及人工地震探测的速度差异,都是需要参考的地球物理因素。

重力的数据处理和解释同其它地球物理方法一样,是多解的。同时,重力的解释往往立足于“构造运动能引起地壳介质的密度变异”这一先决条件。因此,本文的观点还有待于进一步讨论。

(本文1990年1月10日收到)

4) 杜官恒、刘昌铨,太原、宣化人工地震剖面解释,1989.

参 考 文 献

- [1] Каратаев, Г.И., и др., Решение некоторых задачи гравиразведки и магниторазведки на электронных цифровых машинах, Трубы И.Г.Вых., 21, 52—72, 1963.
- [2] 山西省地层表编写组, 华北地区区域地层表, 山西省分册(一), 地质出版社, 1979.
- [3] 山西省地层表编写组, 华北地区区域地层表, 山西省分册(二), 地质出版社, 1979.
- [4] 刘若新、杨美娥、晋怀济、郭金弟、王文朝, 华北地区新生代碱性玄武岩中超镁铁质捕虏体的初步研究, 地震地质, Vol. 3, No. 3, 1981.
- [5] 刘光夏、王敬禹、王渐辉、任文菊, 卫星照片的线性破裂解译, 西北地震学报, Vol. 6, No. 2, 1984.
- [6] 丁国瑜, 活动走滑断裂带的断错水系与地震, 地震, No. 1, 1982.
- [7] 赵文俊, 潜在震源区划分的深部标志, 中国地震, Vol. 4, No. 1, 1988.
- [8] 刘光夏、赵文俊、任文菊、吴岫云, 试论龙门山重力梯度带—兼论松潘、平武、迭溪等地震区的深部构造特征, 地震地质, Vol. 11, No. 2, 1989.
- [9] 国家地震局“深部物探成果编写组”, 中国地壳上地幔地球物理探测成果, 地震出版社, 1986.

PRELIMINARY RESULTS OF 3-D GRAVITATIONAL FORWARD AND BACKWARD CALCULATION IN NORTH-EASTERN SHANXI PROVINCE AND ITS VICINITY

Liu Guangxia⁽¹⁾, Zhao Wenjun⁽²⁾, Ren Wenju⁽¹⁾, Wu Xiuyun⁽¹⁾

Abstract

This paper mainly describes the preliminary results of deep crustal structure in north-eastern Shanxi Province and its vicinity from 3-D gravitational forward and backward calculation with the help of geological and regional gravity data. By 3-D normal calculation, the residual gravity at various depths is obtained, then, the plane distribution of crustal thickness in the whole region is inversed using the given depth of Moho. Based on the results above, the 'top-deep' variation of some active faults and structures is simply discussed. In addition, the deep crustal tectonic background of the earthquakes and the Quaternary volcanic activities is studied. It is also found that there maybe exists a shear tectonic belt at depth along 40°N.

(1) Geophysical Prospecting Brigade, SSB, Zhengzhou, China

(2) Seismological Bureau of Hainan Province, China