

京津及河北省中部的重力三维正演 结果及其地质意义

刘光夏 赵文俊 王敬禹 王浙辉 任文菊*

(国家地震局地球物理勘探大队)

摘 要

使用重力资料推断解释地壳深部构造,关键在于浅层影响的消除。作者广泛收集整理研究区的浅层地质资料,用三维重力正演方法逐层消除其影响,获得了一些较好的结果。在正演计算中发现,一些构造在下第三系以下已基本消失;而另一些构造却在此深度才逐渐显露。我们认为,浅层地质资料越完整准确,则三维重力正演计算的结果也将越好。在地壳深部构造的研究中,此方法与人工地震测深得到的地壳厚度基本一致,而花费却很低廉。它也是研究深浅构造关系的一种好方法。

关键词 重力;三维正演;浅层影响;剩余异常;深部异常;地质意义

一、三维重力正演方法

重力资料的推断解释方法有三个特点:一是模拟性,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,致力于解释某种地质问题^[1]。利用重力资料推断地壳深部构造就更强化了上述特点。根据地矿部“区域重力调查技术规定”的有关说明^[2],布格重力异常值可以看作是地面观测点以下不同深度、不同规模和不同密度地质体引力效应的总和。为了使布格重力异常中的深部信息得到最充分的显示,需要设法抑制浅层地质体的干扰。对此,国内外大多采用平均场法、或向上解析延拓法、或频率域滤波等低通滤波方法。

我们认为,应用这些方法必须具备如下假定条件:

1) 只有当地质体的规模相同或水平分布一定时,其埋藏深度与重力异常的频谱间才存在一一对应关系;2) 浅部和深部地质体重力异常的频谱特性有明显差异。但是,上述假定往往容易被忽略而未加考虑。而在地质构造稍微复杂些的地区又与实际不符。因为地质体的横向变化同样影响重力场的频谱特性。例如,研究区平原部分的第四系以及上、下第三系,覆盖面积广、规模大,使布格异常中的低频成分大为增强,用上述低通滤波方法难以滤掉这些新生界的影响;至于山区,不同密度和规模的地层相互衔接、犬牙交错,使重力异常的频谱更趋复杂。总之,由于浅层地质的复杂多变,以往推断解释的结果,就出现

本文 1986 年 3 月 1 日收到,1986 年 7 月 9 日收到修改稿。

* 别良峰、阎空军和丁兴明三位同志参加了部分资料收集工作。

了使用同样的重力资料,因滤波方法的不同而结果却相差甚远的问题^[3],解释总不能令人满意。

看来,浅层地质体的展布规模及其垂向和横向变化能否查明,并有效地消除其影响,是重力资料推断解释地壳深部构造效果好坏的关键。本文作者之一于1983年提出采用Каратаев等人的三维正演计算公式^[4],具体地计算浅部各地层在地面产生的重力异常,其方法是:

设某一密度介面,其深度为 $z(\rho, \alpha)$, 其密度差为 $\sigma = \sigma_{\pm} - \sigma_{\mp}$, 该介面以上的物质在地面上 M_0 点产生的重力异常值为:

$$G_z(M_0) = f\sigma \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \int_0^{z(\rho, \alpha)} \frac{\rho z}{(\rho^2 + z^2)^{3/2}} d\alpha d\rho dz \quad (1)$$

式中 f 为引力常数,若 z_0 为介面的平均埋藏深度,设

$$\Delta z(\rho, \alpha) = z(\rho, \alpha) - z_0 \quad (2)$$

将(1)式对 z 积分;并展成 $\Delta z(\rho, \alpha)/\sqrt{\rho^2 + z_0^2}$ 和 $\Delta z(\rho, \alpha)/\sqrt{\rho^2 + z^2(\rho, \alpha)}$ 的级数,取其第一项变换后得到

$$\begin{aligned} G_z(M_0) &= 2\pi f\sigma \left[\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} z(\rho, \alpha) \frac{z_0 \rho}{(\rho^2 + z_0^2)^{3/2}} d\rho d\alpha \right] \\ &= 2\pi f\sigma \left[k(\rho_0) z(M_0) + k(\rho_1) \sum_{q=1}^4 (m_q) + \dots \right. \\ &\quad \left. + k(\rho_9) \sum_{q=1}^8 (m_q^9) + \dots + k(\rho_{15}) \sum_{q=1}^4 z(m_q^{15}) \right] \quad (3) \end{aligned}$$

这里, z 为每环所取点的深度值。(3)式为(1)式积分的近似计算公式。式中各项系数 $k(\rho_i)$ 见文献[5]。该正演公式的计算精度,在地形起伏较大的山区,误差不超过10%。

用上述公式就能计算各浅层地质体所产生的重力异常,并从布格重力异常中逐层消除,从而获得能够反映地壳构造的深部重力异常^[5]。

在使用深部重力异常反演莫霍介面深度时,是将剩余深部重力异常分布作为固定不变的基准曲面,采用三维正演方法,计算莫霍介面深度分布的初值和修改值所产生的重力异常值分布,并逐次逼近作为基准的剩余深部重力异常曲面。而在控制点上则始终保持人工地震测深给出的已知深度值。这样经多次迭代,就得到了莫霍界面的最佳深度分布。正演计算的百分误差一般小于5%;反演计算的曲面拟合标准误差一般小于 $5 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$ 。若以三倍标准误差为限,则莫霍介面 1km 以上的深度变化是可信的。误差估算参阅文献[6]。

反演计算中,莫霍介面深度分布的初值是可以随意给出的,不影响取得最佳结果;迭代所需的深度修改值 δz , 是根据正演曲面与剩余深部异常曲面的各点残差值 $\delta G_i = \Delta G_{\text{第}i\text{次正演}} - \Delta G_{\text{深部}}$, 利用 $\delta z_i = \delta G_i / 2\pi f\sigma$ 给出的。这里虽然用了 $2\pi f\sigma \cdot h$ 这一无限平板计算公式,但由于残差值 δG 和修改量 δz 都是二阶小量,从得到的莫霍面深度分布图上多处仍保留展布范围 50km 左右的局部隆起看,可以不考虑该公式产生的 6—12 倍莫霍面深度波长的滤波作用。

二、浅部岩层岩体构成了一幅变化多端、极其复杂的三维非均匀图象

研究区各时代地层总厚度超过 10km。固安、歧口、渤海、武清北、霸县、保定、饶阳、河间和任丘等地, 地层总厚度达 11—15km。各类火成岩体, 大小迥异、深浅不同, 广布于燕山和太行山区。这些几乎占据地壳厚度一半的地质体, 在岩性、单层厚度和密度上差别很大, 构成了一幅变化多端, 极其复杂的三维非均匀图象。

太古界深变质地层主要分布于燕山, 以一定倾斜裸露地表。迁安、遵化、青龙一带, 最大厚度一万至一万二千米。密云以北, 承德西北和崇礼以南, 厚度也在七千米以上^{1), 2)}, 同位素年龄大于 30 亿年。平原区厚度不详, 下元古界区内不多, 故并入太古界考虑。在太古和下元古界之上, 不整合地覆盖着轻微变质的海相中、上元古界地层, 可分出长城、蓟县和青白口三个“系”一级的地层单位³⁾, 岩性分别为碎屑岩、硅质白云岩和粘土岩, 同位素年龄为 19—6 亿年。总厚度在蓟县达一万余米。平原区厚度根据钻孔编制⁴⁾。随后, 沉积了海相寒武系和奥陶系, 厚度各稳定在七百米左右。上奥陶至下石炭系缺失。中、晚石炭世和二迭纪, 开始出现海陆交替相到陆相沉积。石炭一二迭系厚约一千四百米, 密度接近而作一层考虑。以上古生界地层主要出露于唐山、兴隆和京西北, 平原区厚度根据钻孔编制⁵⁾。中生界主要为侏罗系(少量三迭、白垩系并入侏罗系考虑), 北京西山门头沟出露较全⁶⁾; 宽城、青龙、承德等地亦有大片分布⁷⁾。岩性为中、基性火山岩及其碎屑岩, 厚度皆在四、五千米。平原区厚度不超过二千米, 主要分布于武清、歧口⁸⁾。新生界广布于平原和渤海海区。始新世到渐新世, 地壳遭受强烈拉张, 形成一系列凹陷和隆起。固安一带下第三系厚度达八、九千米⁹⁾。厚度大于五千米的还有武清、霸县、饶阳、河间、保定、黄骅、歧口以及图幅东部海区¹⁰⁾。渤中、沧县、海兴、静海、牛驼镇和大兴, 下第三系很少或基本没有沉积。晚第三纪继承了早第三纪的盆-岭古构造地貌, 但沉降幅度已经变小。上第三系只有图幅东部海区达到四千米以上¹¹⁾; 歧口、霸县、武清也有二千五六百米, 其余广大地区, 厚度一般小于一千五百米¹²⁾。第四系平铺在上第三系之上, 平均厚 450—500m。值得注意的是, 沿昌平, 顺义西南、宝坻西南、宁河和渤海一线, 出现了一条厚度增至 600—1000m 的第四系深槽^{13), 14)}。怀来, 延庆断陷盆地自成一体, 下第三系最厚可达 1700m, 上第三系 300—400m¹⁵⁾、

1) 河北省地质局区域地质图“承德幅”、“密云幅”、“崇礼幅”。

2) 参阅了孙大中、王启超、张建中等人的总结报告。

3) 即震旦亚界。见“晚前寒武纪地层分类命名会议纪要”1982 年 7 月。

4) 参考崔步洲同志的资料。

5) 参考齐纪抗同志的资料。

6) 参考陈瑞琪、李拜等同志的资料。

7) 区域地质图“青龙幅”、“山海关幅”、“承德幅”、“崇礼幅”。

8) 根据大港油田编侏罗系厚度图。

9) 根据北京市地震地质会战第二专题组编构造体系图改算得出。

10) 引自石油部渤海石油公司地调大队 1984 年编渤海下第三系厚度图。

11) 引自石油部渤海石油公司地调大队 1984 年编渤海上第三系厚度图。

12) 根据石油部物探局资料改算。

13) 引自北京市水文地质图集(1980)和河北水文地质大队编第四系等厚线图。

14) 引自海洋石油勘探局研究院“渤海 1980 年地层分层数据表”, 以及李祥根同志 1984 年资料。

15) 根据北京市地震地质会战第二专题组: “构造体系图”改算得出。

第四系在延庆西南又增至 1000m。燕山山区新生界很薄,可忽略不计。

新生界在地壳的最上层,分布广、厚度和面积皆大而密度低,使布格重力异常中的低频成份大为增强,是消除浅层影响的关键地层。

燕山山区的火成岩体规模大,密度与周围岩层又不一样,亦需单独考虑。岩体深度因无确切资料,只好按大型花岗岩和闪长岩体为 10km,较小的碱性岩体为 5km 估计。

现将全区地层及火成岩分为密度各不相同的十二层三尖^{1),2)},列表如下:

地层及火成岩体密度一览表(kg/m³)

| 地 层 | | 火 成 岩 | |
|-------|------|-------|------|
| 第四系 | 2050 | 花 岗 岩 | 2607 |
| 上第三系 | 2110 | 闪 长 岩 | 2719 |
| 下第三系 | 2192 | 碱 性 岩 | 2603 |
| 侏罗系 | 2512 | | |
| 石炭二迭系 | 2606 | | |
| 奥陶系 | 2686 | | |
| 寒武系 | 2663 | | |
| 青白口系 | 2550 | | |
| 蓟县系 | 2750 | | |
| 长城系 | 2620 | | |
| 太古界 | 2650 | | |
| 太古界以下 | 2750 | | |

注: 各系等厚线图因篇幅所限而从略。

三、逐一消除浅层影响,突出深部构造,建立一个由浅而深,深浅结合的密度-构造模型

通过正演计算,求出上表各浅层地质体所引起的重力异常值,再逐一从布格异常(图 1)³⁾中减去,就得到了从图 2 到图 10 的一系列剩余重力异常图(第四系加上第三系,中、上元古界等三层以及古生界三层的剩余异常接近,故皆合并考虑)。

当消除了第四系加上第三系的影响(以下简称“剥去”)之后,剩余异常同布格异常相比,格局未变,但等值线却简练得多(图 2)。布格重力梯度带已大为减弱,一些小的圈闭串通成几个大的封闭。大兴隆起仍为封闭状态,剩余异常减少;固安凹陷开始封闭,剩余异常增加($\pm 10^{-4}\text{m/s}^2$) 宁河以东的渤海海区,一条北西西走向的密度差异带初露端倪。图幅东南隅的剩余正异常,显示了郯庐断裂带的影响。剥去下第三系后(图 3),固安凹陷的剩余正异常,一跃而成全区之冠,并形成明显的梯度带。大兴隆起已解体成梯度斜坡。等值线在武清、宝坻聚敛为梯度带。渤海北西西向密度差异带进一步清晰。下第三系之下,平原区剩余重力正异常大量增加,深部构造信息得到了进一步的“提纯”。剥去侏罗系后

1) 密度值主要根据河北省地矿局物探大队和石油部物探局资料。
2) 太古界以下密度根据 Woollard 1962, 1965 年资料。
3) 国家地震局物探大队 1972 年编制。

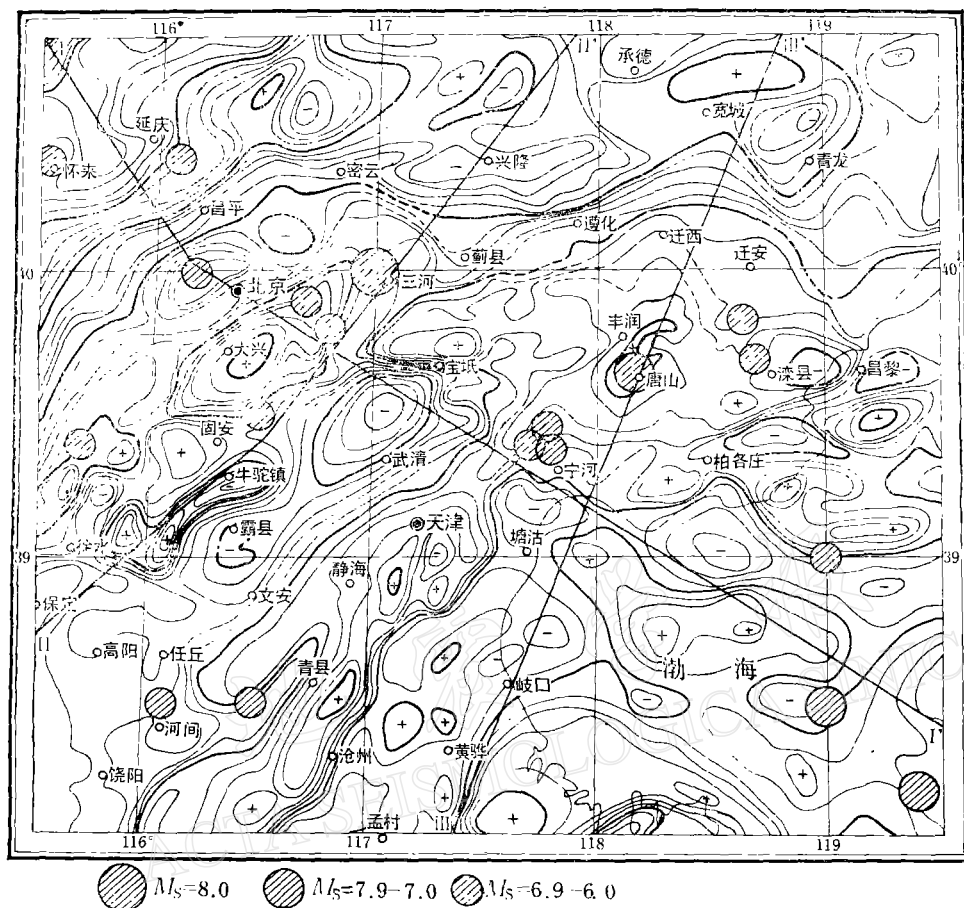


图1 京津及河北省中部布格重力异常图

(图4), 迁安—迁西—承德一线的东西两端, 等值线显示背向圈闭。剥去古生界后(图5), 固安、武清及青龙、兴隆的剩余重力异常皆有所增加, 其它不变。剥去中、上元古界(图6), 三河、蓟县、固安、宝坻、丰润、唐山等地, 剩余异常减小, 而青龙东南部却增值较多。怀来和延庆开始显现相对较高值的封闭线。剥去太古界(图7), 青龙到兴隆出现了一条明显的梯度带。燕山东段等值线仍然保持两种形态。当剥去了太古界以下最后一个密度层之后, 就得到了反映地壳下层结构构造的深部重力异常(图8)。渤海深部正异常面积较陆地大, 主要分布在歧口和图幅东南, 其余海域也大多为零值; 陆地平原区深部正异常, 自从剥去下第三系之后, 格局基本不变。如固安正异常形态突出; 霸县、饶阳和青县等地的正异常亦自成封闭; 大兴—北京—怀延深部负异常斜坡步步增大, 怀延盆地圈闭了相对较高的剩余异常。广大平原区负值普遍很低, 只有武清、宝坻、徐水和沧州东南达到较大负值。山区宽城、兴隆东南和迁西, 各出现一片深部正异常。宽城西, 深部负异常递增。燕山东段在深部异常图上进一步显露差异, 青龙—兴隆梯度带更加清晰, 同地表的断裂带¹⁾符合很好。从昌平、北京到宁河、渤海的密度差异带越发明晰。

1) 河北省地质图, 河北省地质局 1973 年编。

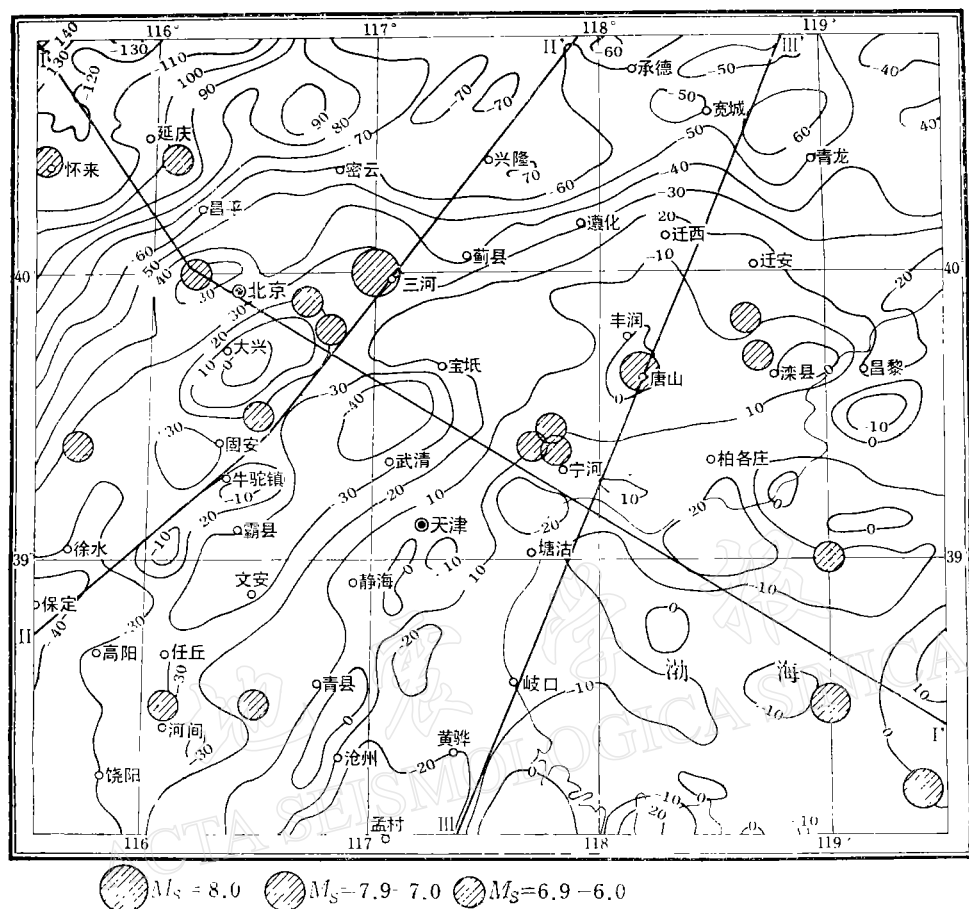


图2 京津及河北省中部第四系及上第三系以下剩余重力异常图

最后,利用一个人工地震测深点(固安),用正演异常曲面逐步逼近深部剩余重力异常曲面的方法,经多次迭代计算,求得了莫霍界面的最佳起伏状态(图9),不少地方同人工地震结果近似¹⁾。

昌平—密云—兴隆—承德一线以南以东的广大地区,地壳厚度低于华北的平均值——35km,深部重力正异常区的地壳厚度皆在30km左右;此线以西以北,地壳厚度普遍大于35km,图幅西北隅地壳最厚,达38—40km。地壳等厚线主要走向为北东、北西和东西三个方向。昌平—蓟县一线以南,唐山—宁河—塘沽—沧州一线以西地区,主要是北东走向;昌平—蓟县—迁安以北则为东西走向。宝坻、滦县、昌黎、柏各庄等地亦为东西走向,唯有唐山至宁河,插入了北北东成份。沿昌平—北京—宁河—渤海,地壳等厚线各向相反方向圈闭,这一几乎斜贯全区的深部物质变异带至此暴露无遗。地壳等厚线把燕山东段又截为东、西、北三部分:东部为迁安、迁西、宽城、青龙区域;西部为兴隆、密云区域;北区为承德。地壳等厚线圈出了量值、范围、形态和梯度各不相同的九个莫霍面隆起区和

1) 国家地震局物探大队,京津唐地区地壳厚度与震中分布图(人工地震测深),1981。

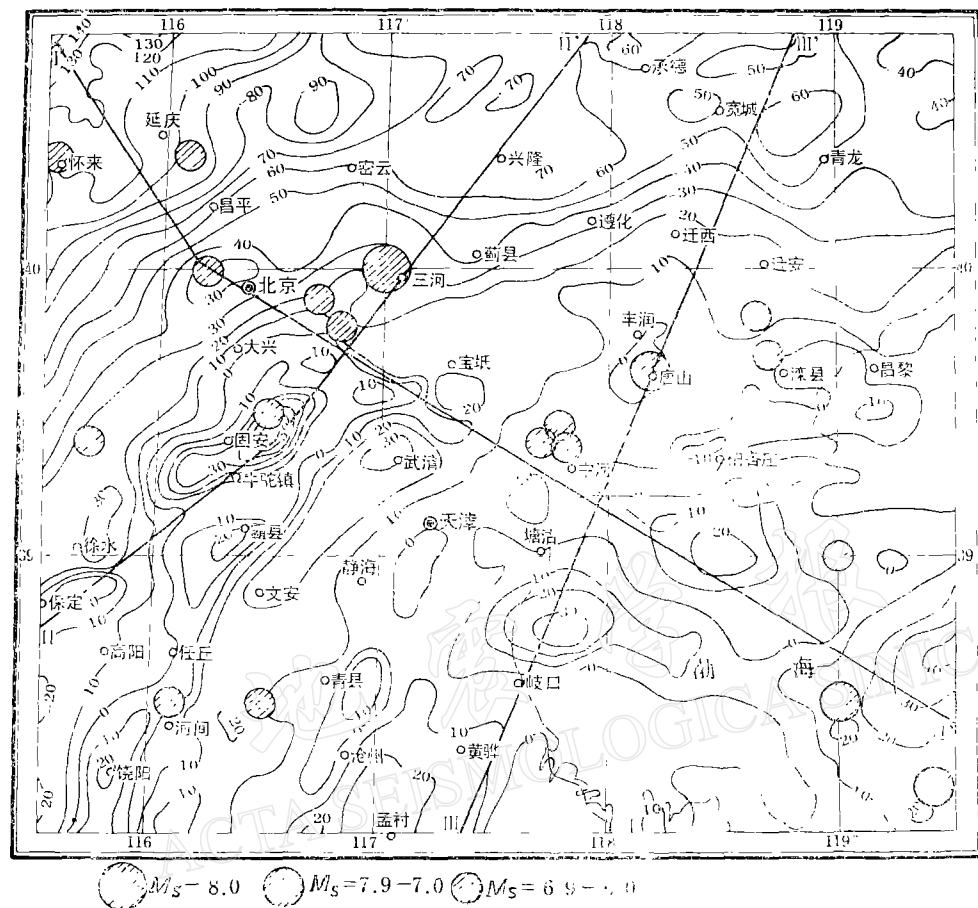


图3 京津及河北省中部下第三系以下剩余重力异常图

三个凹陷区, 九个隆起区是:

1. **岐口隆起** 高点在岐口和塘沽之间, 地壳厚度 28km. 外圈 31km 线拉长成北西西走向.
2. **固安隆起** 28km 线围成一个长 60km, 宽 10—15km 的北东向椭圆, 并形成一定梯度.
3. **渤海隆起** 位于图幅东南, 地壳厚度 29km, 应是郯庐断裂伸入渤海的反映.
4. **霸县隆起** 地壳厚 29km, 等厚线形成梯度带, 通向河间.
5. **饶阳隆起** 地壳厚 29—30km.
6. **保定隆起** 地壳厚 30km.
7. **青县隆起** 地壳厚 30km.
8. **延庆隆起** 地壳厚 35km.
9. **燕山东段隆起** 由 31km 等厚线圈闭. 地壳厚度从外围 34km 逐渐紧缩成 3 个 29km 的高点, 两个在迁西以北, 一个在青龙东南.

三个凹陷是:

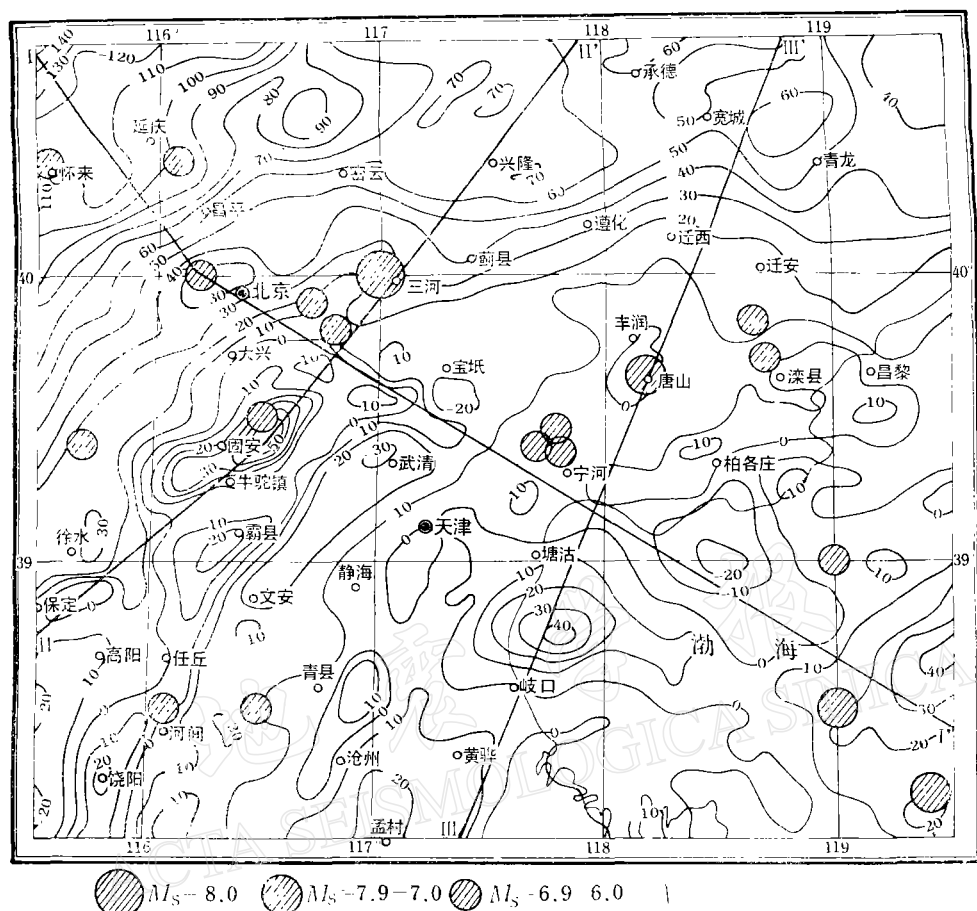


图 4 京津及河北省中部侏罗系以下剩余重力异常图

10. 渤中凹陷 位于柏各庄以南海域,地壳厚 33km,与 32km 线一起圈闭成北西西走向。

11. 武清凹陷 33km 线圈联文安。

12 孟村凹陷 位于沧州以南图边,地壳厚 33km。

以上是平面上的情况。为了了解有关构造随深度的变化,可参阅图 10。

四、地质意义和讨论

正演计算的结果使我们认识到,研究区可能存在两种类型的构造:一类是被正演“剥皮”剥掉了的表层构造。如宝坻断裂、昌黎—宁河断裂、沧东断裂和大兴隆起两侧断裂。它们在布格异常图上,都有梯度带指示其存在,但当剥去下第三系之后,就很不清楚了。这类断裂的深度看来仅及第三系底面或稍深。我们的初步认识同石油勘探资料及某些作者的研究结果是一致的^[7]。另一类断裂和构造则在下第三系以下越来越清楚。如昌平—渤海北西西向密度变异带、青龙—兴隆的梯度带、以青龙为中心的燕山东部地壳构造区,特

别是以歧口和固安为代表的莫霍面隆起区和三个莫霍面凹陷区。它们都是在剥去上、下第三系先后显露,越向下剥,形态越完美。这应是深部构造的反映。

不少作者都提出了发震构造的共轭断裂问题^[8,9],而地震震中也确实存在两个方向的排列^[10]。通过本次工作,我们找到了京津唐密度界面在地壳深部具有北东/北西西两个方向的梯度变化,这可能是深部共轭断裂的反映。

大面积的深部重力正异常和莫霍面隆起,应该导源于地壳或壳下高密度物质上涌,渤海和华北平原的高地热流值与之密切相关。例如,已知的地热异常带(牛驼镇、雄县、北京、怀延、渤海等)往往处于莫霍界面隆-凹的交介部位。渤海和任丘二油田都位于莫霍面隆起附近,同中东、美、苏的大油气田所处的深部构造位置相似。青龙、宽城、迁西、迁安以及承德等地的金属、非金属矿产多达 40 余种^[11],也同该区的深部构造分不开。

本次工作得到固安和燕山东段的地壳厚度较人工地震测深小 3—5 km。可能有重力和人工地震两种结果的误差,也有我们参数选取的问题,如沉积层密度随深度的变化;岩浆岩体的深度;平原区结晶地层的厚度等资料都很少,这对结果都有影响。尽管如此,笔者仍然认为,如果不同密度的地质体的拼合能够引起质量差异;如果较大的密度界面能代表地块或地体之间的接合,则用此方法可以较快地获取大面积深、浅构造关系和地壳深部信息。

石油部和河北省地矿局的下属单位提供了各时代地层厚度资料。整个计算工作是在我大队 TQ-16 机上完成的;图件的缩照、清绘和植字由王开明、朱秀华等同志担任,作者谨向他们表示诚挚的谢意。

参 考 文 献

- [1] 郭武林,重力勘探及其推断解释,中国地质报,1984 年 2 月 27 日第 3 版。
- [2] 中华人民共和国地矿部,区域重力调查技术规定,85—86,1983,地质出版社。
- [3] 王谦身,中国东部海域地壳构造的讨论,中国地球物理学会第一次全国地壳与上地幔学术讨论会文集,1984。
- [4] Каратаев Г. И. и Другие Решение, некоторых задач гравиразведки и магниторазведки на электронных цифровых, Академия наук СССР, Сибирское отделение, Труды ИГИГ. Вып 21, 38—40. 1963.
- [5] 赵文俊、郑书真、黄桂芳、朱秀华,京津地区的地壳厚度,地震科学研究,1983,3: 1—3。
- [6] 赵文俊、郑书真、黄桂芳、方盛明,豫鲁部分地区的地壳厚度,华北地震科学 1987,5,1,1—8。
- [7] 杨承先,华北新生代裂谷系的断块结构及重力滑动构造,地震,1981,6: 14—18。
- [8] 陈宗基、郑建中、刘进、邹英,华北大震成因初探(概述),地震成因学术讨论会论文(摘要),1983,中国地球物理学会。
- [9] 章光月、邓起东、蒋溥,在地震孕育和发展过程中共轭断裂活动的作用,地震地质 1980,2,1,19—25。
- [10] 张四昌,华北地区的地震分布图象与共轭孕震构造,华北地震科学,1985,3,2,11—12。
- [11] 青龙县欢迎中外投资开矿,中国地质报,1985 年 8 月 15 日第 3 版。

1) 河北省地矿局综合研究地质大队,河北省地质矿产研究第一集,1981。

THE RESULTS OF THE 3-D GRAVITATIONAL CALCULUS AND ITS GEOLOGICAL SIGNIFICANCE IN BEIJING-- TIANJIN AREA AND THE CENTRAL PART OF HEBEI PROVINCE

LIU GUANGXIA, ZHAO WENJUN, WANG JINGYU, WANG ZHEHUI AND REN WENJU
(Geophysical Prospecting Brigade, State Seismological Bureau)

Abstract

The key to deduction of the deep crustal structure using gravity data is to removing reasonably the influence of shallow layers. Authors collected and sorted of the shallow geological data extensively in the studied area, then utilized a 3-D gravitational formula to remove its influence layer by layer and obtained good results. Results indicate that some structures under the Eocene System basically disappeared and structures of other kinds gradually appeared. It is pointed out that the more complete and accurate shallow geological data are used, the better the results of the 3-D gravitational calculations can be obtained. This method can yield the results that is unified basically with the deep crustal structure inferred from deep seismic sounding. It is also a good and economical way for studying the relationship between shallow and deep structure.