

# 论华北地区的均衡状态(二)

## ——复合补偿与深部构造

冯 锐

张 若 水

(国家地震局地球物理研究所)

(国家地震局地震技术学校)

郑书真 王 均 黄桂芳 严惠芬

周 海 南

(国家地震局地球物理勘探大队)

(国家地震局地球物理研究所)

### 摘要

由试验均衡的理论出发, 得到了该区的均衡响应函数并建立了复合补偿模式。地形高度对重力场的影响很复杂, 波长小于 300km 的地形起伏具有偏高的均衡响应值。局部补偿是华北地区的主要补偿机制, 所占比例达 90%。区域补偿的等效弹性板厚度偏小, 仅 18km, 表明了华北地壳破裂程度严重和下地壳流变性突出。均衡重力异常具有块体分布和均衡调整方向同新生代构造运动方向不完全符合等特点, 其中一些成分是由于表浅层地质体的非均匀载荷所造成, 不能简单地归因于欠补偿或过补偿。均衡异常的垂直导数分布清晰地揭示了华北地区几条重要的断块分界线。从深部构造上看, 均衡补偿过程发生在下地壳特别是上地幔中。本文从均衡的角度探讨了地震危险性。

**关键词** 试验均衡; 复合补偿; 壳内非均匀载荷; 均衡异常的垂直导数; 华北断块

试验均衡的特点在于从地表负荷与重力异常的对应关系出发研究补偿的最终结果, 它未涉及具体的物理模型, 所得的均衡异常更具综合性。本文由此出发, 进一步反演出复合补偿模型的物理参量, 分析华北均衡异常场的特点, 最后从地质与深部构造上进行成因探讨。

### 一、复 合 补 偿

#### 1. 均衡响应函数

假定点荷载的均衡补偿是线性且各向同性的, 那么地形  $H(x, y)$  同重力异常  $\Delta g(x, y)$  的关系可在频率域中由线性均衡关系表达:

$$F[\Delta g] = Q(k)F[H] + N_G \quad (1)$$

式中符号同文献 [1] 的 (6) 式, 噪声项  $N_G$  代表着重力异常与地形不相关的部分, 主要反

1986 年 7 月 9 日收到本文初稿, 1987 年 10 月 8 日收到修改稿。

映地壳内侧向非均匀性引起的小尺度异常。 $Q(k)$  为均衡响应函数, 反映着单位高度地形的重力效应。这里假定地表点状负荷的补偿是柱状对称的, 故  $Q$  值仅是波数  $k = (k_x^2 + k_y^2)^{1/2} = 2\pi/\lambda$  的函数, 它的最佳估值可由实测布格重力异常  $\Delta g_b$  与  $H$  的互相关谱求得,

$$Q(k) = \frac{\langle F[\Delta g_b] \cdot F^*[H] \rangle}{\langle F[H] \cdot F^*[H] \rangle} \quad (2)$$

$F^*[\cdot]$  是复数共轭二维谱,  $\langle \cdot \rangle$  为括号内两项复数谱函数乘积的实部在  $(k_i - \Delta k \leq k \leq k_i + \Delta k)$  环带内的平均值。当将局部补偿与区域补偿综合起来时, 岩石圈等效弹性板(厚度为  $d_1$ )的弯曲变形  $w$  为<sup>[2]</sup>

$$F[w] = (1 - \alpha) \frac{\rho_1 g}{(\rho_m - \rho_1)g + D_F k^4} F[H] \quad (3)$$

$D_F$  为板的弯曲刚性,  $g$  为重力加速度,  $\rho_1$  为地壳上表层密度,  $\alpha$  为局部补偿比例因子。当  $\alpha = 100\%$  时,  $w \equiv 0$  是完全局部补偿; 当  $\alpha = 0$  时, 为完全弹性板弯曲补偿。对应(2)式的复合补偿模型的均衡响应函数的理论值为:

$$Q(k) = -2\pi G \rho_1 \left[ (1 - \alpha) g \frac{(\rho_0 - \rho_1) + (\rho_m - \rho_0) \exp(-kd_1)}{(\rho_m - \rho_1)g + D_F k^4} + \alpha \exp(-kd_1) \right] \quad (4)$$

$d_1$  为地壳厚度,  $\rho_0$  是地壳中下部密度。若取  $\rho_1 = 2670 \text{ kg/m}^3$ , 则对于甚低频部分有:

$$\lim_{\lambda \rightarrow \infty} Q(2\pi/\lambda) = -2\pi G \rho_1 = -1.12 (\text{g. u./m}) \quad (5)$$

该常数即为一个均匀层的均衡响应值, 式中 (g. u.) 是一个重力单位 =  $1 \mu\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$  =

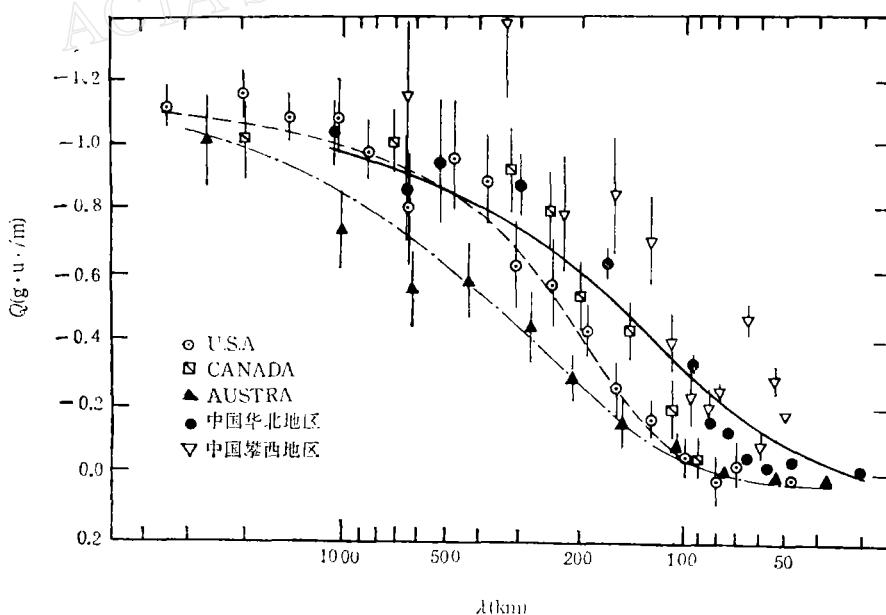


图 1 华北地区实测的均衡响应函数(实线为依反演结果求得的理论响应函数, 图中加拿大、美国和澳大利亚的结果引自 McNutt<sup>[3]</sup>, 黎西地区引自叶正仁等<sup>[4]</sup>, 各点的垂直线段给出了测定的标准误差。)

$10^{-6}\text{m/s}^2$ 。根据实测值由(2)式求得的  $Q(k)$  分布见图 1。

均衡响应函数  $Q$  对波长  $\lambda$  的分布表明, 地形高度  $H$  对重力值  $\Delta g$  的影响是复杂的, 二者比例系数随波长而变, 不能用  $\Delta g = a + bH$  这类简单的线性关系表达。图 1 表明, 除稳定的古陆块澳大利亚的  $Q$  值系统偏低外, 对  $300\text{km}$  以上的低频成分, 华北同美国和加拿大地台区的均衡响应几乎完全一致, 而且在甚低频部分都稳定地趋于  $-1.1\text{g.u./m}$  左右。但对波长小于  $300\text{km}$  的高频成分, 中国华北和攀西地区的响应函数相对偏高, 这意味着中小尺度的地表非均匀负荷有较大的重力影响, 它们可能是破坏华北地区均衡状态的主要因素。

## 2. 复合补偿

由(4)式不难得到  $Q(k)$  对  $\alpha$ ,  $D_F$  和  $d_2$  的偏导数:

$$\begin{cases} \frac{\partial Q(k)}{\partial \alpha} = -2\pi G\rho_1 \left[ -g \frac{(\rho_0 - \rho_1) + (\rho_m - \rho_0)\exp(-kd_1)}{(\rho_m - \rho_1)g + D_F k^4} + \exp(-kd_2) \right] \\ \frac{\partial Q(k)}{\partial D_F} = 2\pi G\rho_1(1 - \alpha)g \frac{(\rho_0 - \rho_1) + (\rho_m - \rho_0)\exp(-kd_1)}{[(\rho_m - \rho_1)g + D_F k^4]^2} k^4 \\ \frac{\partial Q(k)}{\partial d_2} = 2\pi G\rho_1 \alpha k \cdot \exp(-kd_2) \end{cases} \quad (6)$$

于是可构成形如  $AX = b$  的方程组,  $A$  为以上述偏导数为元素的矩阵,  $b$  为由(2)式确定的观测值  $Q_o(k)$  同由(4)式推算的计算值  $Q_c(k)$  间的残差量,  $X$  为模型的修改向量。取  $\rho_1 = 2670\text{kg/m}^3$ ,  $\rho_0 = 2840\text{kg/m}^3$ ,  $\rho_m = 3270\text{kg/m}^3$  和该区地壳平均厚度  $d_1 = 37\text{km}$ <sup>[1,5]</sup>, 可由线性反演理论求得华北地区复合补偿模型的三个基本参数为:

$$\alpha = 90\%, \quad D_F = 1.2 \times 10^{20}\text{Nm}, \quad d_2 = 18\text{km}$$

据此算出的理论值见图 1 实线。反演结果说明: 华北地区的均衡补偿过程主要是由局部补偿实现的, 占  $90\%$  的比例, 而区域补偿只占  $(1 - \alpha) = 10\%$  的很小比重, 这种补偿机制的构成同北美地区 ( $\alpha = 91\text{--}95\%$ ) 相近而与澳大利亚 ( $\alpha = 63\text{--}66\%$ ) 相差颇大<sup>[3]</sup>。弹性板的弯曲刚度  $D_F$  尽管同美、加、澳地区  $10^{19}\text{--}10^{21}\text{Nm}$  相近, 但  $18\text{km}$  的等效弹性板厚度却明显偏小。这似乎存在着两层含义: 一则该区地壳破裂程度严重, 大范围完整的等效弹性板补偿机制已难起到作用; 二则在大约  $20\text{km}$  深度以下, 该区的下地壳岩石显然存在着相当突出的易形变特征。即是说覆盖在软流圈上的岩石圈又可进一步被划分成上部的弹性-脆性层与下部的粘性-韧性层, 这三个物理性质不同的层位, 都会对均衡的调节起补偿作用。

## 3. 试验均衡异常

均衡响应函数  $Q$  确定之后,  $Q \cdot F[H]$  的傅氏逆变换即是补偿的重力效应, 于是试验均衡的重力异常  $\Delta g$  可由下式的二维傅氏逆变换求得:

$$F[\Delta g_i] = F[\Delta g_s] - Q(k) \cdot F[H] \quad (7)$$

这种推断均衡异常的方法虽然简单, 但也有弱点, 它要求研究区域比较大才能得到较可靠的甚低频(波长为几千公里)时的  $Q$  值, 而区域扩大之后块体之间的均衡差异又容易被掩盖。

## 二、均衡重力异常

### 1. 基本特征

由局部补偿(图2, 见书末图版)和复合补偿求出的华北均衡重力异常(图3)在分布形态上具有极大的相似性, 这同该区以局部补偿为主的结论相吻合。基本特征是:

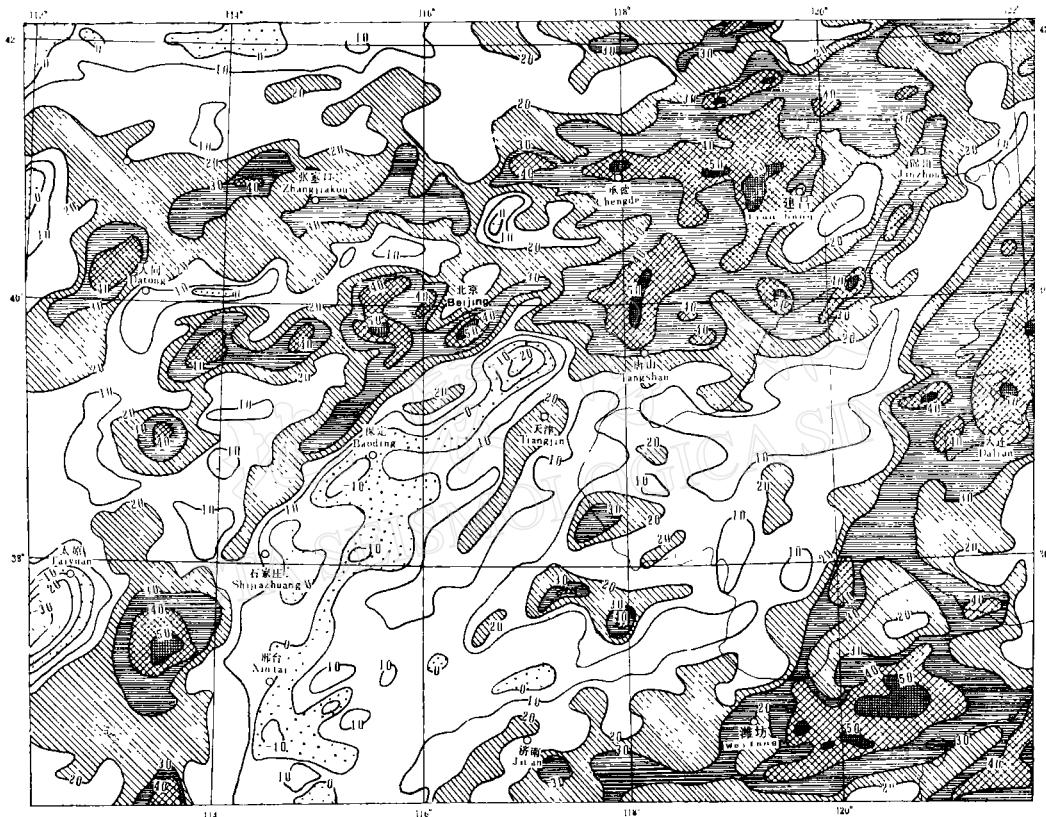


图3 华北地区试验均衡重力异常(单位:  $10^{-5} \text{m/s}^2$ )

(1) 全区均衡重力异常水平( $-30$ 到 $+50 \cdot 10^{-5} \text{m/s}^2$ )明显低于布格重力异常( $-200$ 到 $+20 \cdot 10^{-5} \text{m/s}^2$ ), 均衡校正使布格异常总幅值降低了约60—70%, 说明均衡补偿是华北地区岩石圈演化中的一个重要动力因素。但这个补偿并不完全,  $+18 \cdot 10^{-5} \text{m/s}^2$ 左右的全区平均值表明新生代以来华北地台仍整体性的处于亚均衡状态, 伴随补偿调节的构造运动依然在持续之中。对于500km以上的长波长成分, 异常值较小( $-10$ 到 $+30 \cdot 10^{-5} \text{m/s}^2$ ), 全区还存在自东而西逐渐变小并以北东-南西走向为主的特征。

(2) 华北地台内的均衡程度不均一, 具有明显的块体分布特征(参见文献[1]的图1)。位于大兴安岭—燕山—太行山一线的中国东部深层构造带将该区分成特征相异的东西两部: 东部以重力高为主, 西部为弱的重力低。平均 $+40 \cdot 10^{-5} \text{m/s}^2$ 的正异常区集中分布在胶辽和燕山两断块内; 平均 $-10 \cdot 10^{-5} \text{m/s}^2$ 的负异常区集中于山西地堑; 而在冀

鲁断块和内蒙断块内则分别表现为以正值为主和以负值为主的高低值相间排列的特点。异常值的变化在几个块体内一般都较平缓,但在其交界部位呈现出急剧的变化,比如在郯庐断裂带、燕山-太行和冀鲁断块的交汇处出现强正异常分布等等。

(3) 均衡调整方向同新构造运动方向不完全符合。除掉地壳表浅层的内载荷影响外,如果认为均衡重力高起因于深部岩浆的侵入和下地壳的相对加厚,那么均衡调整力应使该区呈现沉降运动,但胶辽、燕山断块实际上却为新构造运动的隆起区;反之,负异常的山西地堑却为中新生代的强烈沉降区。这种中新生代褶皱区越年轻、不均衡程度越高的现象在全球是具有普遍性的。与此相反,在冀中与渤海盆地内,随着地壳被拉张而减薄,差异构造体的水平尺度多数小于200km,这里新生代的强烈沉降运动又与均衡调整力的方向完全符合。可见,均衡异常与构造运动间的关系相当复杂,对华北地区目前我们还不能得出一般性的结论来。

图3试验均衡异常的分布比图2按最佳局部补偿模型求得的结果更为平缓:在燕山-太行山以东的广大正异常区平均降低 $10 \cdot 10^{-5} \text{m/s}^2$ 左右;在西部集宁-张家口地区又提高 $10 \cdot 10^{-5} \text{m/s}^2$ 左右,全区平均值基本未变,区域性的补偿起到一定的作用。根据图1实测 $Q(k)$ 的外推得到 $Q(0) = -1.06 \text{g.u./m}$ ,则可算出地壳表浅层的平均密度应为 $2540 \text{kg/m}^3$ ,它大体相当于对酸性火成岩和石灰岩的平均密度值。对应这个已经偏小了的低频 $Q$ 值,华北地区的均衡异常仍然大部分为正值,表明地壳表浅层中的那些高密度

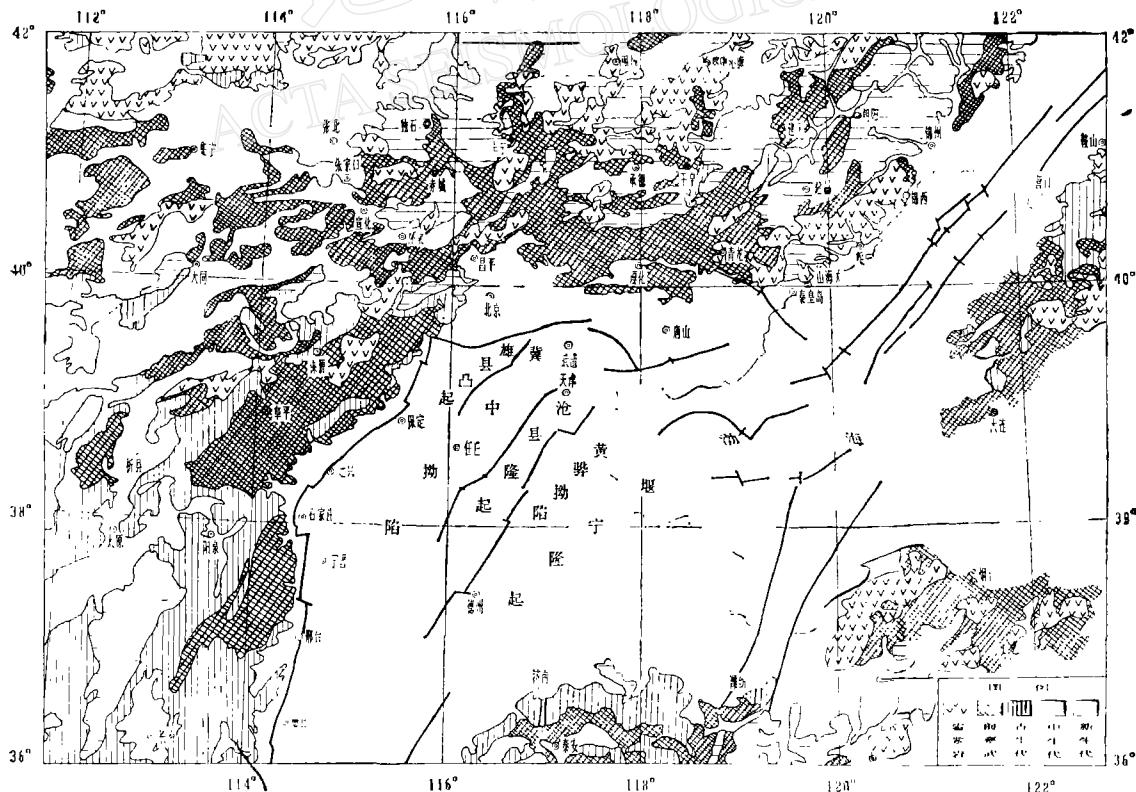


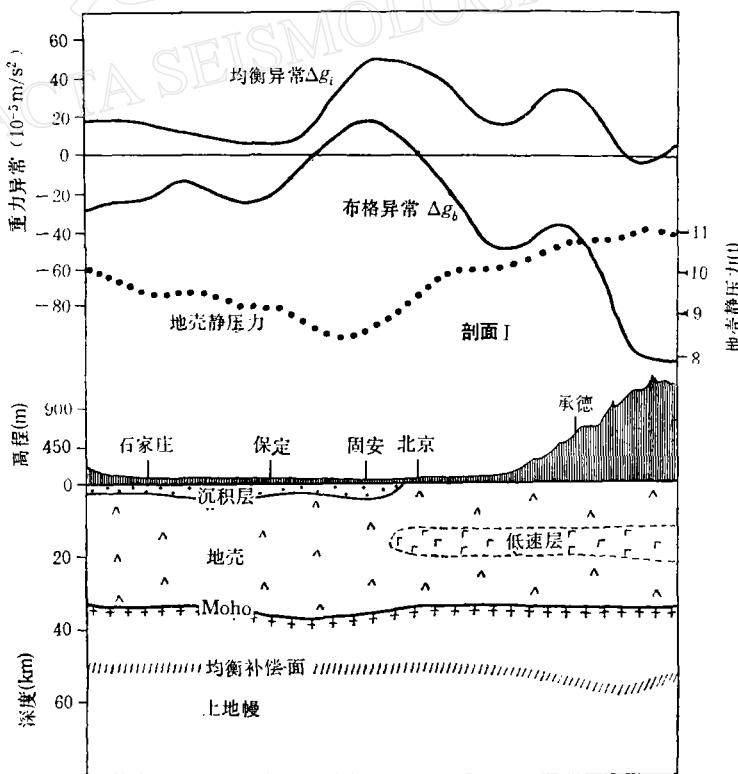
图4 简化的华北地区地质图

地质体对均衡状态的破坏作用是不容忽视的。

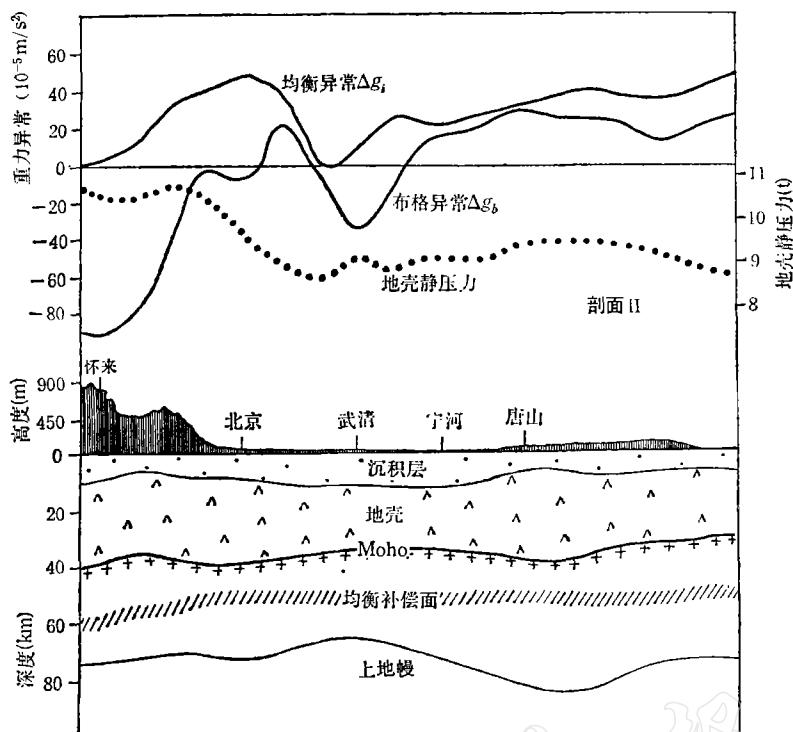
## 2. 壳内非均匀载荷

壳内非均匀载荷系指地壳表浅层内部密度与构造的横向非均匀分布，它们常常会引起较大的局部性均衡异常，这种异常的侧向分布的某些规律性有时比布格异常图还更容易为地质学家所应用<sup>[6]</sup>。从华北地区均衡异常图(图 2—3)与地质图(图 4)的对比中，亦可看到二者间的一定对应性。

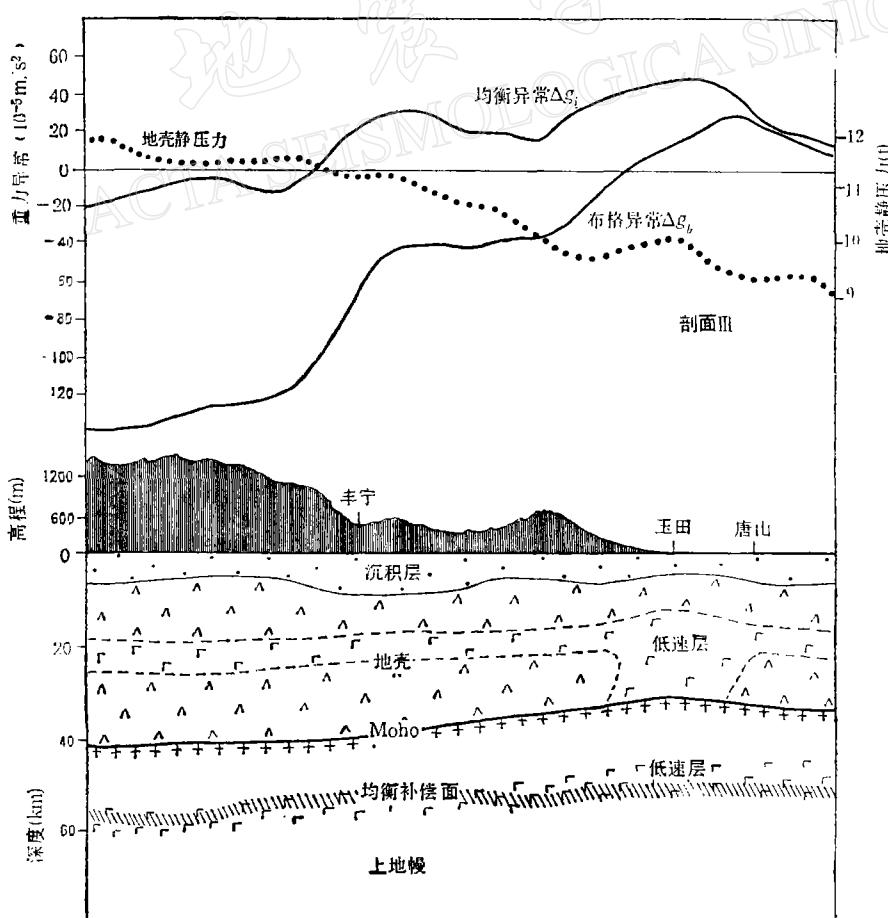
(1) 呈现高均衡异常的地区：(a) 前寒武纪古老基底出露区。正异常值一般在  $30-40 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ ，如太行山的东北段(北京—保定—石家庄西侧)、燕山东段(唐山—遵化—青龙附近)、辽东半岛、山东半岛和一些相对孤立的露头区(泰安、承德地区)等，岩性多为密度偏高的片麻岩、角闪岩和铁镁质火成岩。特别是唐山—遵化地区的正均衡异常区，范围大而数值高( $40-50 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ )，反映出这块华北古陆核的影响，它的原岩组成以超基性和基性火山岩为主，形成年龄约 36 亿年<sup>[7]</sup>，是迄今华北地区发现的最古老岩石区；(b) 古生代的基岩出露区。以燕山和胶辽断块最为清晰，大范围  $20-30 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$  左右的正异常分布是这两个断块的基本特征。当然局部性差异也存在，比如在建昌—朝阳地区有密度偏低的中生代中性喷出岩与凝灰岩，对应着封闭型的局部重力低，它使燕山东段的高均衡异常区在这里分成锦州和建平两支向东北方延伸。另外，在北京附近和大连—烟台间分别存在正异常连续分布，但在地质图上却呈现局部的中断，这显然是新生代沉积物的覆



(a)



(b)



(c)

图 6 三条横剖面的对比 [剖面位置示于文献 [1] 的图 3(a)]

盖所致；(c) 某些隆起的结晶基底。比如华北平原自东而西成北东向平行排列的埕宁隆起、沧县隆起、雄县牛驼镇凸起和宁晋凸起等等，这些地区的高均衡异常反映着深部密度偏大物质的上拱。

(2) 呈现低均衡异常的地区：(a) 某些断陷盆地和基底拗陷区。最明显的是太原一大同的汾渭断陷盆地，该处堆积了数千米的第三、第四纪陆湖相沉积，至今仍在进一步发展中，均衡负异常(或相对低值)区与盆地的分布对应很好，亦成雁行排列，其中太原盆地有一 $-30 \cdot 10^{-5} \text{m/s}^2$  左右的最低值。在华北平原内，冀中拗陷和黄骅拗陷处亦显示出重力低；在沉积层总厚度达 9km 的武清凹陷，其均衡异常达  $-20 \cdot 10^{-5} \text{m/s}^2$ ，成为京津唐地区最突出的一个局部异常点；(b) 某些熔岩台地。在大同一张家口—集宁及其西北是新生代沉积区与张北熔岩台地，广泛分布的汉诺坝玄武岩是一种新生代的喷发岩，并混夹着沉积岩层，在图 2 中有大范围  $-10 \sim -10 \cdot 10^{-5} \text{m/s}^2$  的低异常值。但该处的整体性构造可能较好，故复合补偿作用使负值分布特征出现大范围改变(图 3)。

上述一系列的对比表明，均衡异常图中包含着相当丰富的地质构造信息，我们很难将这些高低异常分布统归于欠补偿或过补偿。计算表明，对于内载荷来说，即使处于完全补偿状态也难以扣除掉它的局部重力影响，原因在于补偿过程的构造深度相对较大，不能抵消掉浅部扰动源的高频重力异常(见文献[6]的图 8)。当然，除浅表层的内载荷外，深部的动力学过程也是引起均衡异常的深刻原因。

### 三、深 部 构 造

均衡异常作为位场，可依下式求得向上延拓到  $z$  高度的一阶垂直导数  $\Delta g'_{iz}$ ：

$$F[\Delta g'_{iz}] = -k \cdot F[\Delta g_i] \cdot \exp(-kz) \quad (8)$$

$\Delta g_i$  是地表处的均衡重力场。图 5(见书末图版)是上延 20km 的  $\Delta g'_{iz}$  分布，全区的异常值都平等地分布在  $\pm 0.6 \cdot 10^{-8}/\text{s}^2$  (即  $\pm 0.6$  毫伽/公里) 以内了。这个图与伪磁力异常图相仿，能够更加突出地显示地壳上部的差异构造和浅层密度的侧向变化。图 5 表明，华北地区重要的断块分割线有三条：(1) 邢庐断裂带(营口—潍坊)；(2) 燕山—太行山前断裂带(锦州—唐山—北京—磁县)；(3) 赤城—建平断裂带(集宁—张家口—承德—朝阳)。它们的  $\Delta g'_{iz}$  值均高于  $0.3 \cdot 10^{-8}/\text{s}^2$ ，这三条断裂带显然是深部岩浆上涌的主要通道，其他断裂带的规模都比不上这三条。后两条断裂带又被晚期的北西向构造切割成若干段(比如在青龙、北京和石家庄附近均有显示)，由此形成若干个水平尺度小于 300km 的块体，这些高差异构造体对均衡重力异常有重要影响。

华北地区详细的地质与地震测深资料表明，沉积层的分布同地形紧密相关，在平原厚达 4—9km，在山区基岩出露地表，使表层的质量盈亏一直延续到海平面下。在分析地壳均衡状态时，如果把外载荷与内载荷都考虑进去，那么至少应估算到结晶基底的深度上才合理。事实上，华北地区上地壳底界面的起伏是相当平缓的，基本上在 10km 深左右，上层的波速在 6.0—6.2km/s。所谓“山根”与“反山根”的构造形态只是在中下地壳的若干内界面和 Moho 面上才表现出来，上地壳的物质分布实际上属于破坏均衡的非均匀内载荷。图 6 给出了地震测深方法所得三条剖面的深部构造<sup>[3,9,10]</sup>，根据详细的二维地壳速度模

型, 我们计算了各剖面地壳总质量在 Moho 面处的累积静水压力值  $p = \sum g \rho_i h_i$ , 发现压力  $p$  值的分布依然同地形  $H(x, y)$  有一定正相关, 进一步说明在 Moho 面上并没有完全实现均衡, 故补偿调节的动力学过程肯定要向 Moho 面以下的更深处延续<sup>[1]</sup>. 曾融生曾由地震面波资料求得华北正常均衡面可达到 41km<sup>[11]</sup>, 比该区 37km 的平均地壳厚度要大; 此外, 天然地震体波、转换波、人工地震测深和大地电磁测深等结果也都指出, 40—80km 深度处存在有稳定的易流变的上地幔低速层. 有趣的是, 在第三条剖面上由本文推断的均衡面位置竟同地震测深的一个上地幔低速层位置彼此吻合[图 6(c)]. 看来, 粘滞系数较低的上地幔低速层有可能是达到大范围重力均衡的大体部位, 即力学的均衡面存在着某种构造上的显示.

不论均衡调整的浮力是否同地表载荷上下对应, 地壳内最大剪切应力的深度分布均有一定的规律. 取地壳厚度 30km, 再以双层结构模拟上地幔, Caputo(1985) 的计算表明<sup>[12]</sup>: 壳内最大剪切应力的峰值出现在 15—30km 深度处, 可为表层荷载的 25% 以上; 而当上浮力与载荷有一定水平偏离时, 这种高剪切应力的分布区还将延续到更大的深度. 华北地区的地震活动表明, 强震的发生部位并不是简单地对应于高均衡异常区, 而常常是在高均衡异常区与山区的分布不吻合之处(比如燕山地震带和松辽地震带), 或者高垂直导数带被截断的部位<sup>[13]</sup>, 这里不仅反映出均衡浮力、构造应力与地表荷载间存在水平与垂直方向的失稳, 也反映出不同尺度的地质体存在均衡调整时间上的差异.

#### 四、结 论

1. 对于地壳浅部和表面质量的非均匀分布, 在地壳与上地幔中存在着均衡补偿的复杂过程, 目前我们所能估算出的仅是其中静力学的一部分, 而且在对均衡的解释推断中, 定性的成分较大. 均衡重力异常分布图中所包含的内容已经超出了均衡补偿本身, 它是岩石圈静力与动力学过程的一个综合反映.

2. 由各种合理补偿模型求得的均衡重力异常是总体相吻、形态相近的. 在频率域中用连续模型的三维位场公式和试验均衡关系, 都可以快速求得均衡重力异常分布. 各地区的最佳补偿模型必须经反演计算和大量的模型对比才能确定, 普遍适用的模型是不存在的. 华北地区的主要补偿机制是局部补偿, 标准地壳厚度 50 km.

3. 均衡异常和垂直导数分布图包含有丰富的地壳中上层的地质构造信息. 高低异常区的分布同岩性、基底起伏和断裂带展布有紧密关系: 高异常区常对应前寒武纪古老基底出露区、古生代的基岩出露区和某些隆起的结晶基底; 低异常区常对应某些断陷盆地、基底拗陷区和熔岩台地等地区, 不能简单地将之归因于欠补偿或过补偿. 华北地区的异常分布具有块体特征, 均衡调整方向同新构造运动方向不完全符合.

4. 从构造上看, 地形起伏属外载荷, 沉积层与上地壳属内载荷. 破坏华北地区均衡状态的主要因素可能是由那些尺度在 300km 以下的不同地质体所造成. 重力均衡的补偿作用发生在物理性质不同的三个层位中, 它们是岩石圈上部的弹性-脆性层、下部的粘性-韧性层和软流圈. 深部构造中的 Moho 界面具有强补偿作用, 但它并不等同于均衡理论中定义的力学等压面. 粘滞系数较低的上地幔低速层有可能是达到大范围重力均衡的大体

部位。

作者感谢中国人民解放军国防科技大学研究所“银河”机组对工作的支持，感谢马桂明、郭松萍在整理手稿和绘制图件上的帮助。

### 参 考 文 献

- [1] 冯 锐、王 均、郑书真、黄桂芳、严惠芬、周海南、张若水, 论华北地区的均衡状态(一)——方法和局部补偿, 地震学报, 1987, **9**, 4, 406—416.
- [2] Wolf, D., Isostatic compensation and continental lithospheric thickness, *J. Geophys.*, 1984, **54**, 2, 110—113.
- [3] McNutt, M., Implications of regional gravity for state of stress in the Earth's crust and upper mantle, *J. Geophys. Res.*, 1980, **85**, B11, 6377—6396.
- [4] 叶正仁、谢小碧, 攀西地区的重力均衡与地壳结构, 地球物理学报, 1985, **28**, 3, 260—267.
- [5] 冯 锐、郑书真, 对华北岩石圈构造的综合研究, 科学通报, 1987, **32**, 22, 1420—1424.
- [6] Simpson, R.W., R.C. Jachens, and R.J. Blakely, A new isostatic residual gravity map of the conterminous United States with a discussion on the significance of isostatic residual anomalies, *J. Geophys. Res.*, 1986, **91**, B8, 8384—8372.
- [7] 刘国栋, 华北断块区结晶基底的早期结构, 中国科学院地质研究所、国家地震局地质研究所编, 华北断块区的形成与发展, 62—72, 1980, 科学出版社.
- [8] 孙武城、李松林、杨玉春, 华北东部地区地壳结构的初步研究, 地震地质, 1985, **7**, 3, 1—12.
- [9] 刘昌铨、嘉世旭, 唐山地震区地壳上地幔结构特征——2D 非均匀介质中理论地震图计算和结果分析, 地震学报, 1986, **8**, 4, 341—353.
- [10] 邵学钟、张家茹、陈学华、章思亚, 京津唐地区地震转换波测深结果, 地震地质, 1980, **2**, 2, 11—20.
- [11] 曾融生, 莫霍界面的重力补偿和地壳结构的基本模式, 地球物理学报, 1973, **16**, 1—5.
- [12] Caputo, M., V. Manzetti, and R. Nicelli, Topography and its isostatic compensation as a cause of seismicity: a revision, *Tectonophysics*, 1985, **111**, 25—39.
- [13] 冯 锐、黄桂芳、郑书真、王 均、严惠芬、张若水, 华北地区地壳构造与地震活动, 地质学报(待发表).

## ISOSTATIC STATUS IN NORTH CHINA (2) —COMPOSITE COMPENSATION AND DEEP STRUCTURE

FENG RUI

(Institute of Geophysics, State Seismological Bureau)

ZHANG RUOSHUI

(Seismological Technique College, State Seismological Bureau)

ZHENG SHUZHEN, WANG JUN, HUANG GUIFANG, AND YAN HUIFEN

(Geophysical Exploration Brigade, State Seismological Bureau)

ZHOU HAINAN

(Institute of Geophysics, State Seismological Bureau)

### Abstract

From the theory of experimental isostasy, an isostatic response function and composite compensation model are derived for that region. There is a quite complicated relationship between topography and gravitational field, in which the topographical relief with a wavelength shorter than 300 km is of relatively high isostatic response. In the isostatic compensation process of North China local compensation is essential, and the ratio of its gravitational effects to that of the total compensation is 90%, in contrast to this, the thickness of equivalent elastic plate of regional compensation is small, being only 18 km. This indicates that in North China there exist serious crustal cracking and prominent rheological property in the lower crust. It is found that the distribution of isostatic anomaly shows blockwise pattern, furthermore the direction of isostatic adjustment is not completely identical to that of Cenozoic tectonic movement. Some isostatic anomalies come from inhomogeneous internal loads distributed in the shallower crust or at the surface, and can not be interpreted simply in terms of under- or over-compensation. The vertical derivative of isostatic anomaly distinctly reveals several important tectonic boundaries within North China. In the aspect of deep structure, the isostatic compensation process takes place in the lower crust and especially in the upper mantle. The seismic risk in North China is also discussed from the view point of isostasy.