

均衡异常与现代构造应力场的初步研究

——以东海及其东缘海为例*

张赤军¹⁾ 方 剑¹⁾ 马宗晋²⁾

1) 中国武汉 430077 中国科学院测量与地球物理研究所

2) 中国北京 100029 中国地震局地质研究所

摘要 从现代构造运动的实际出发, 放弃了过去那种只认为因补偿过剩和补偿不足的均衡调整的观点, 探讨了引起不均衡的构造应力, 并视均衡异常为地球内部的一种负荷, 由此可以计算得到地球内部的应力. 研究结果表明: 东海及其东缘海地区由均衡重力异常推求的垂向应力的变化比水平应力更为显著, 在琉球海沟一带存在 5 MPa 垂向应力的增强, 它明显地反映了板块俯冲的作用. 在海沟西北侧的岛弧一带的应力状态则与之相反, 约存在 5 MPa 的垂向应力减弱. 东西两部分的水平应力在方向上有明显的不同, 洋壳上的东西向应力 σ_x 为负 (压力为正), 而陆壳上则相反. 这正表明了板块间相互挤压的作用.

关键词: 均衡异常 构造应力 板块运动

中图分类号: P315.72⁷ **文献标识码:** A

引言

现代构造应力与应变机制的研究在构造物理中起着重要作用, 因为应力与应变影响着板块边界及其内部的构造行为. 这种构造行为在形变的几何场与重力、地热、地震等地球物理场中也应有所反映. 例如, 在我国东海及其外侧的边缘海, 有人根据 GPS 观测与震源机制解研究了构造运动及构造应力场. 一般从物理概念出发, 地球内各种应力的相互作用势必趋于均衡状态, 在失去均衡平衡后需要进行均衡调整, 以便恢复到均衡状态. 已发表的不少论文, 往往是从这一观念出发, 较好地解释了一些地质地球物理现象, 如冰后回弹等 (马杏垣, 1989; Bjerhammar, 1980). 然而, 有许多情况并非如此, 如现今仍在继续进行的新构造运动, 若是再用均衡调整作解释是不合适的. 因此, 基于这一观点, 本文着重研究了那种正在破坏均衡平衡的机制和力源.

在新构造运动地区确实存在着一些物质向着与均衡调整的反方向运动. 例如, 喜马拉雅一带, 均衡异常虽在 $100 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 以上, 但地壳还在上隆, 即朝着不均衡方向发展; 地震资料也揭示, 海拔 8 848 m 珠穆朗玛峰下面的地壳厚度仅为 53 km 左右, 而海拔只有四五千米的青藏高原南部的地壳厚度却大于 70 km (黄怀曾, 吴功建, 1994), 其原因在于: 喜马拉雅可能存在着受热的异常地幔向上隆升 (张赤军, 1997). 基于这一思想, 笔者对东海

* 国家自然科学基金 (49874016)、中国科学院知识创新项目 (KZCX2-106) 和地球空间与大地测量教育部实验室共同资助.
2001-11-30 收到初稿, 2002-08-05 收到最后修改稿, 2002-10-07 决定采用.

及其东缘海区构造应力场也做了较为深入的研究.

1 均衡异常及应力的计算

一般情况, 均衡异常(Δg_i)都是在地壳均衡假说的基础上计算得到的, 其定义为

$$\Delta g_i = g - \gamma_0 + \beta h - 2\pi G\rho h + \delta g_t - \delta g_c \quad (1)$$

式中, g 为研究点上的重力, γ_0 为参考椭球上的正常重力, h 为高程; β 为正常重力垂直梯度, 现取为 $3.086 \times 10^{-9} \text{ s}^{-2}$; $2\pi G\rho h$ 为布格层改正, G 为引力常数; ρ 为地壳密度, 一般取为 2670 kg/m^3 , δg_t 为地形改正, δg_c 为均衡补偿改正. 到目前为止, 尽管均衡假说不一, 但从国内外学者和我们研究的结果表明, 同一点上的 Δg_i 相差甚小, 即使在喜马拉雅山一带, 经典均衡说与实验均衡说的结果也很接近. 因此, 本文的计算仍采用较为简单的 Airy-Heiskanen 模型. 在计算中, 只要有了重力值和数字高程模型, 即可按已知的公式求取任一点上的 Δg_i 值. 顺便指出, 这里的 Δg_i 是归算到大地水准面上的值, 由于它已基本上消除了莫氏面以上质量的影响, 故可认为它是最大补偿深度上的值, 可设该深度为 100 km . 这里采用了 360 阶 EGM-96 的地球重力场模型, 其扰动位为 T (许厚泽, 陆仲连, 1997), 可写为

$$T = -\frac{GM}{r} \sum_{n=2}^{360} \left(\frac{R}{r} \right)^n \left(\sum_{m=0}^n \bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda \right) \bar{P}_{nm} \sin \varphi \quad (2)$$

而重力异常

$$\Delta g = -\frac{\partial T}{\partial r} - \frac{2}{r}T = \frac{GM}{r^2} \left[\sum_{n=2}^{360} (n-1) \left(\frac{R}{r} \right)^n \sum_{m=0}^n \bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda \right] \bar{P}_{nm} \sin \varphi \quad (3)$$

式中, r 为地面点距地心的向径, R 为地球半径; λ, φ 为经纬度, GM 为地球引力常数; $\bar{C}_{nm}, \bar{S}_{nm}$ 为正常化重力位系数; \bar{P}_{nm} 为正常化勒让德连带多项式, 其中的 Δg 即为式 (1) 中的 $(g - \gamma_0 + \beta h)$. 关于地形、均衡改正则采用 ETOPO5 全球 $5' \times 5'$ 数字高程资料, 最后按式 (1) 进行计算, 其结果如图 1 所示.

根据均衡异常研究深部的应力分布, 现作如下假定:

1) 经地形和补偿改正后的均衡异常, 已基本上消除了地表及壳内扰动物质的影响, 这时可以认为在地壳内影响流体静力平衡的效应已基本消除, 且无论用哪种均衡模型来计算, 其结果均很接近.

2) 从动力机制上考察均衡异常, 这时需追究产生均衡异常的原因和由此引起力的量级(大小)和方向.

3) 由于我们在计算均衡异常时采用了均衡深度(线性均衡模型例外), 对于 Airy 假说, 正常地壳深度一般取 $30 \sim 40 \text{ km}$, 但在山区均衡补偿的深度都比它大, 在西藏更大, 可达到 80 km 左右, 现取之为 100 km . 这一数值几乎与岩石层的厚度相近. 这时可以认为, 破坏均衡平衡的异常源主要在地球深处. 这里将均衡异常视为由具有一定厚度 H 的板体引起的. 它

所产生的压强为 ρgh , 由此可根据弹性力学计算出地球内任一点上的位移和应力. 此处 ρ 为岩石层密度, g 为重力加速度, 由 ρgh 值可以算出相应面积上的压力 P , 这时即可根据下列公式计算出任一深度上的应力值.

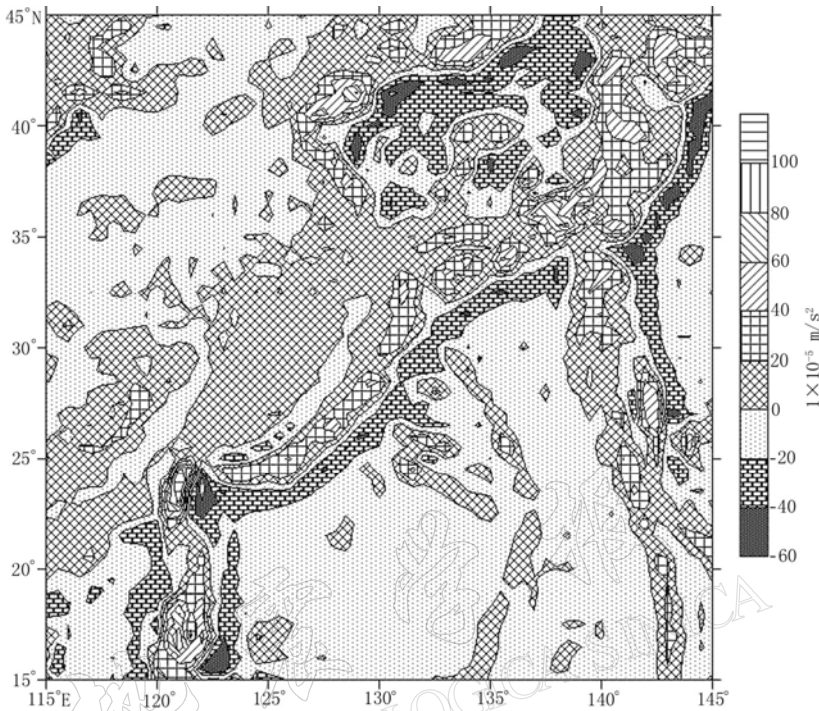


图1 均衡重力异常图

由于经地形均衡改正后的均衡异常已经顾及地形起伏及地壳厚度不均的影响, 故可以认为, 这时的均衡异常等效于上述板体底部单元面积 dA 上的负荷 $\rho g H dA$, 且 $\rho g H dA = P$. 人们可根据 Δg_i 求出相应于该板体的厚度 H , 亦即 $H = -\Delta g_i / 2\pi g \rho$. 此处假设与距离有关的常数为 c , 它相当于岩石层的厚度, 且令 $c = 100 \text{ km}$.

$$R_1^2 = r^2 + (z - c)^2$$

$$R_2^2 = r^2 + (z + c)^2$$

$$r^2 = x^2 + y^2 = (i - i_0)^2 + (j - j_0)^2 \cos^2 \varphi \Delta \varphi^2 \Delta \lambda^2 \frac{R^2}{\rho_1^2}$$

式中, 计算点的坐标 x, y, z 是以负荷上方的地面点为原点的坐标, 且以 z 轴向下为正, x 向东为正, y 向南为正. R 为地球半径, ρ_1 为弧度(分); i, j 为数据行列表示的顺序; i_0, j_0 为计算点的平面坐标, 将每块(单元)对 (i_0, j_0) 中的计算结果相加, 即得所需之值.

正应力 σ 和剪应力(此处略)可按体内负荷的 Mindlin(1936)公式表达:

$$\sigma_x = \frac{P}{8\pi(1-\mu)} \left[\frac{(1-2\mu)(z-c)}{R_1^3} - \frac{3x^2(z-c)}{R_1^5} + \frac{(1-2\mu)[3(z-c)-4\mu(z+c)]}{R_2^3} - \right]$$

$$\frac{3(3-4\mu)x^2(z-c)-6c(z+c)[(1-2\mu)z-2\mu c]}{R_2^5} - \frac{30cx^2z(z+c)}{R_2^7} - \frac{4(1-\mu)(1-2\mu)}{R_2(R_2+z+c)} \left(1 - \frac{x^2}{R_2(R_2+z+c)} - \frac{x^2}{R_2^3} \right) \quad (4)$$

$$\sigma_y = \frac{P}{8\pi(1-\mu)} \left[\frac{(1-2\mu)(z-c)}{R_1^3} - \frac{3y^2(z-c)}{R_1^5} + \frac{(1-2\mu)[3(z-c)-4\mu(z+c)]}{R_2^3} - \frac{3(3-4\mu)y^2(z-c)-6c(z+c)[(1-2\mu)z-2\mu c]}{R_2^5} - \frac{30cy^2z(z+c)}{R_2^7} - \frac{4(1-\mu)(1-2\mu)}{R_2(R_2+z+c)} \left(1 - \frac{y^2}{R_2(R_2+z+c)} - \frac{y^2}{R_2^3} \right) \right] \quad (5)$$

$$\sigma_z = \frac{P}{8\pi(1-\mu)} \left[-\frac{(1-2\mu)(z-c)}{R_1^3} - \frac{(1-2\mu)(z-c)}{R_2^3} - \frac{3(z-c)^3}{R_1^5} - \frac{3(3-4\mu)z(z-c)-3c(z+c)(5z-c)}{R_2^5} - \frac{30cz(z+c)^3}{R_2^7} \right] \quad (6)$$

式中, R_1 为计算点到 c 点的距离, R_2 为由计算点到镜像点 c' 的距离, μ 为拉梅系数.

根据上述公式计算的垂直正应力 σ_z 见图 2, 水平应力 σ_x 见图 3 (σ_y 从略). 下面将对此作一解释.

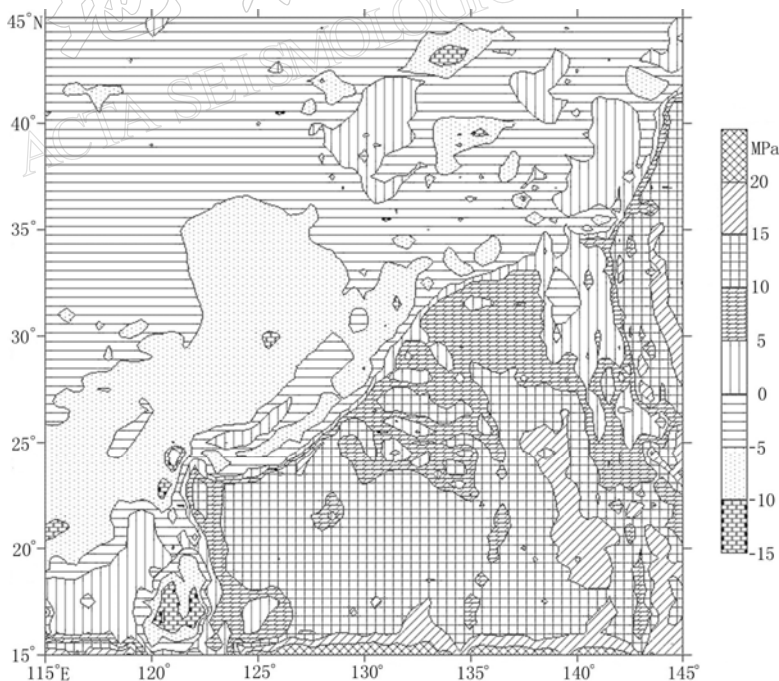


图 2 垂向应力 σ_z 分布图

2 计算结果的分析与比较

如图 2 所示, 在 北纬 35°以南、东经 140°以西, 由日本列岛, 经琉球到台湾省以南沿

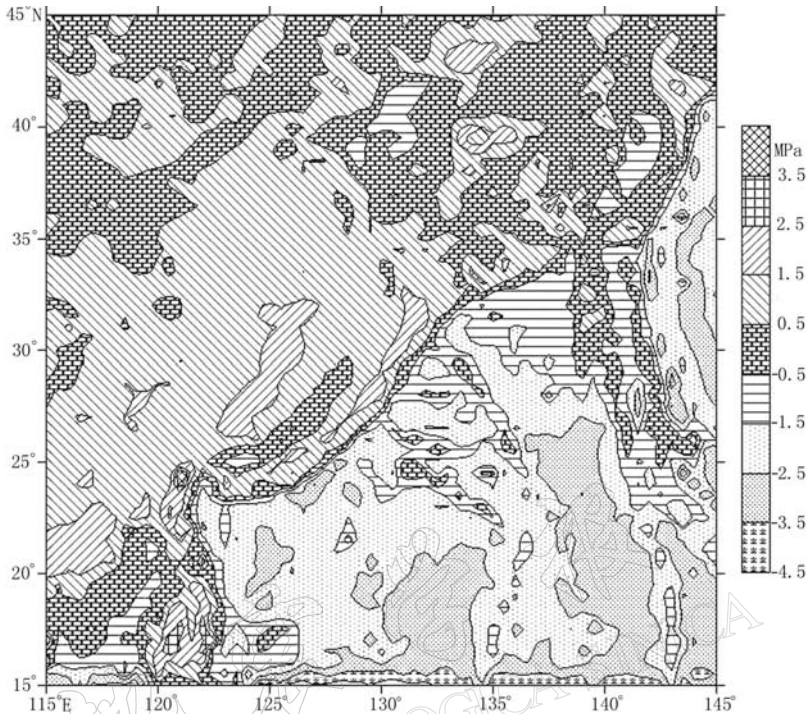


图 3 横向(x 轴)应力 σ_x 分布图

线上的海沟处, 明显地反映了大小为 5 MPa 垂向应力增强. 计算中还发现, x 方向的正应力在上述海沟的两侧也存在方向上的变化, 体现了东西方向上的挤压. 这也反映了日本海沟与琉球海沟以西的欧亚板块与以东的菲律宾板块、太平洋板块的碰撞与挤压. 其中消减下去的岩石层具有近似于 45° 的倾角 (Turcotte, Schubert, 1982), 因此, 在垂直方向上的分力, 可以在重力异常上表现出来, 而板块向西偏北方向的挤压乃是形成琉球岛弧的一个重要原因. 从图中可见, 在岛弧处 σ_z 的方向与海沟处相反, 板块俯冲后地幔处的热对流的推力也是形成岛弧隆起带的原因之一. 同样, 由于菲律宾板块的俯冲等原因构成了新生代的台湾岛弧 (刘光鼎, 1990). 它在琉球岛弧一带的垂向应力减弱了 5 MPa. 有意义的是, 在岛弧一带隆起向上的力与俯冲带向下的力大小相等而方向相反, 并伴有火山活动. 在岛弧与海沟之间的弧前盆地处, σ_z 的方向与海沟处相同, 盖因俯冲和沉积作用所致. 东海陆架海盆地区均衡异常正负相间且错综复杂, 由它算出的 σ_z 亦与之对应, 但从大面积而言, σ_z 在减弱. 这是否表明, 在陆缘盆地有整体上升的迹象. 根据地质地球物理证据 (刘光鼎, 1990), 该区以北东、北北东向张性正断层为主, 多具走滑性质. 断层的作用使盆地内沉积物逐渐增多. 由于断裂形成的时间较早, 如陆架盆地西部主要是早第三纪断裂, 东部为晚第三纪断裂, 由此引发的盆地存在许多沉积物, 加之两大板块碰撞, 有可能使盆地逐步抬升.

地壳如同具有一定厚度的弹性板那样, 由于该区东部太平洋及东南部菲律宾两大板块的俯冲压力以及热动力的作用, 使西部陆壳发生褶皱与弯曲, 并在地表形成高、低相间的波浪式的分布, 诸如在琉球岛弧内外两侧形成弧后、弧前盆地以及钓鱼岛隆起和冲绳海槽等.

在岛弧一带, 地震活动频繁, 地震震中十分密集, 尤其在台湾省附近及其以东海域, 地震活动频度很高, 强度也大. 半个世纪以来, 发生 6 级以上破坏性地震达 10 次以上, 震源深度多在 30 km 以内, 中源的深度主要分布在岛弧构造带之下. 尽管在俯冲带上由均衡异常推估的 σ_z 值很大, 这里发生的地震也较多, 但震源深度却深达 600~700 km.

从海沟以东大面积而言, σ_x 在减弱, 表明总体上存在一大片向西的应力. 而在西部陆壳的大面积上的 σ_x 增强, 则表明存在向东应力. 上述两个方向相反的应力会聚在一起, 构成了该区在水平方向上以挤压为特征的水平应力场, 这在 GPS 的观测中也得到了证实. 若以上海为基点, 由 GPS 测得的形变结果可知(Fournier, 2001), 菲律宾板块以 7 cm/a 方向向西的运动, 标志着该板块存在较大的俯冲速度, 即使在海沟西侧的欧亚板块内仍作相对运动, 如在台湾以东的某点(122.9°E, 24.4°N), 以 4.0 cm/a 向正南方向运动, 在其东侧的某点(124.3°E, 24.3°N)以 2.2 cm/a 向南偏东运动, 另一点(125.2°E, 24.7°N)以 1.1 cm/a 作向南偏东的运动. 以上说明台湾以东的地区在向南东扩张.

根据福建与台湾省之间的 GPS 观测(刘序俨等, 1999), 也证实了西部陆壳受上述菲律宾板块向西偏北的强烈俯冲与挤压, 使大陆产生自西向东的运动速率在减弱, 而控制陆缘盆地与台湾现代构造应力的主要力源乃是菲律宾与欧亚板块的挤压.

地壳失衡所反映的构造运动是地震多发的一个原因, 这些剧烈运动的地带大多分布在太平洋板块、菲律宾板块与欧亚板块会聚的边缘, 尤以上述 3 个板块交汇点的活动为甚, 从震源机制的研究角度看, 该区 7.5 级以上地震都是走滑断层活动的结果, 断层的走向与琉球海沟垂直(Fournier, 2001).

一些资料已经证明(王椿镛等, 1998), 在海沟一带热流值偏低, 琉球—菲律宾的热流值分布呈北东方向, 在岛弧的后侧热流值很高, 构成了岛弧隆起处火山及地震的发生, 在台湾岛热流值高达 160~180 W/m². 产生这种热流的原因主要是板块俯冲后的摩擦作用, 由此引起地幔流动, 使其东侧的岛弧向上隆起, 并使其西侧东海陆架盆地及琉球海槽边缘具有拉张之势, 形成断陷盆地. 自喜山期以来, 该区火山活动甚为频繁, 形成了以玄武岩、安山岩为主的多期活动的火山岩. 在台湾省和钓鱼岛第四纪火山活动更为剧烈, 使地壳上隆, 并将东海琉球盆地与冲绳海槽分隔.

为说明上述板块俯冲的作用, 现以 Doglionicic(1995)一文中的图形(图 4)作一示意. 需

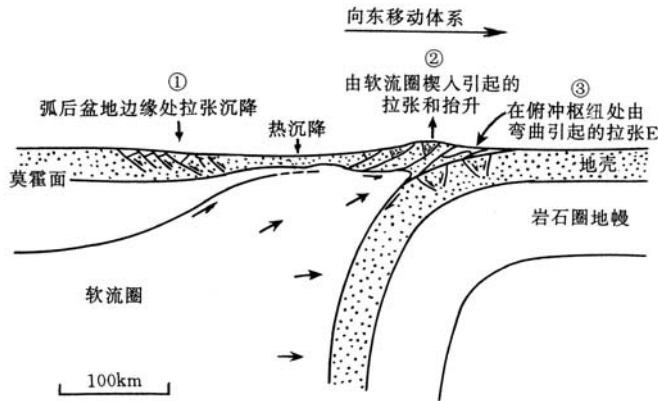


图4 在西倾俯冲体系中可观察到的3种不同类型的拉张(引自Doglioni, 1995)
指出的是, 图中的③处究竟是属拉张还是属挤压状态, 仍值得进一步研究.

3 讨论和结论

由于均衡异常可为研究现代构造提供重要的信息, 因此, 人们已经利用均衡异常研究了地球内部的结构和地壳的运动及地震活动. 通过以上的初步研究, 我们认为还可用它来研究地球内部的应力. 从物理机制上看, 在海沟另一侧岛弧处的均衡重力异常大于零值, 正体现了板块在碰撞和俯冲时产生的端负载、弯力矩使另一板块形成向上的挠曲(Turcotte, Schubert, 1982), 而岩石层中两个板块的相互作用所引起的热对流又强化了岛弧处的隆起. 由于地球内部具有一定的粘滞度, 上述作用所产生的合力或能量可能有一部分为地幔或其它物质吸收, 但其余部分却有可能在重力异常的信息中得到反映, 并能指示出这类构造物理的作用. 因此, 本文建立的将重力异常转换成应力的模式, 以及由此模式计算的应力场, 在理论上是成立的, 对该区发生的构造运动及其力学机制所作的解释也是比较符合实际的. 应该承认, 上述的研究是在比较理想的情况取得的, 然而由于: ①重力异常(均衡)受到地球内部密度分布、热状态、地幔物质流动方式、内部界面的起伏、地球的粘滞度等众多因素的制约, 而这些问题的深入解决将有待于重力学与地质学、地球物理学、地球动力学的进一步结合, 何况现今不同研究者在研究台湾及其以北冲绳海槽的构造成因时却有不同解释(Yang *et al.*, 1996; Wang *et al.*, 1999); ②地球内部存在各种不同的物质界面, 然而在同一层内的不同深度上, 物质的密度也不完全相同, 仅用一简单的均衡模式不一定符合客观实际, 有的地区(如本文研究区域)比较适合, 而另一地区就不一定适合. 因此, 采用何种均衡模型, 以及如何针对不同的地质构造背景采用什么样的动力学模式等等, 仍需进一步研究.

参 考 文 献

- 黄怀曾, 吴功建. 1994. 岩石圈动力学研究[M]. 北京: 地质出版社, 103
刘光鼎. 1990. 中国海区及领域地质-地球物理系列图[M]. 北京: 地质出版社, 1~25
刘序俨, 梁金强, 郭逢英, 等. 1999. 福建及台湾海峡地壳形变图像分析[J]. 地壳形变与地震, 19(增刊B): 15~19
马杏垣. 1989. 重力作用与构造运动[M]. 北京: 地质出版社, 123~143
王椿镛, 陈运泰, 邵占英. 1998. 中国东南缘深部结构与动力学过程[J]. 地壳形变与地震, 19(2): 1~9
许厚泽, 陆仲连. 1997. 中国大地水准面的研究[M]. 北京: 解放军出版社, 104

- 张赤军. 1997. 均衡异常与喜马拉雅隆升[J]. 地壳形变与地震, 7(3): 16~19
- Bjerhammar A. 1980. Postglacial uplifts geopotentials in Fennoscandia[A]. In: Morner Nils-Axel ed. *Earth Rheology, Isostasy*[C]. New York: John Wiley & Sons Press, 323~326
- Doglionico C. 1995. Geological remarks on the relationships between extension and convergent geodynamic settings [J]. *Tectonophysics*, 252: 253~267
- Fournier M. 2001. Regional seismicity and on land deformation in the Ryukyu arc: Implication for the kinematics of opening of the Okinawa Trough[J]. *J Geophys Res*, 106(B): 13 751~13 768
- Mindlin R D. 1936. Force at a point in the interior of a semi-infinite solid[J]. *Physics*, (7): 195~202
- Turcotte D H, Schubert G. 1982. *Geodynamics*[M]. New York: John Wiley & Sons Press, 11
- Wang K L, Chung S L, Chen C H, *et al.* 1999. Post-Sollisional magmatism around northern Taiwan and its relation with opening of the Okinawa Trough[J]. *Tectonophysics*, 308: 363~376
- Yang T F, Lee T P, Chen D H, *et al.* 1996. A double island arc between Taiwan and Luzon: Consequence of ridge subduction[J]. *Tectonophysics*, 258: 85~101

地震学报
ACTA SEISMOLOGICA SINICA

PRELIMINARY STUDY ON ISOSTATIC ANOMALY AND RECENT TECTONIC STRESS FIELD ——TAKING EAST SEA AND ITS EASTERN BOUNDARY SEAS AS EXAMPLE

Zhang Chijun¹⁾ Fang Jian^{1,2)} Ma Zongjin²⁾

1) *Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China*

2) *Institute of Geology, China Seismological Bureau, Beijing 100029, China*

Abstract: On the basis of the reality of recent tectonic movement and discarding such a viewpoint that the isostatic adjustment only results from excessive or insufficient compensation we have discussed the tectonic stress causing inequality and regard the isostatic anomaly as a load on the earth's interior, thus the earth's inner stress can be calculated. The research results show that in the East Sea and its eastern boundary seas area the change of the vertical stress derived from the isostatic gravity anomaly is more marked than that of the horizontal stress. Along the trench there is an enhancement of vertical stress by 5 MPa, which evidently reflects the effect of plate subduction. On contrary, along the island arc to the northwest of the trench the vertical stress weakens by about 5 MPa. The horizontal stresses in eastern and western parts are obviously different that the east-westward stress on the oceanic crust σ_x is negative (while the pressure is positive) but on the continental crust is positive. These facts indicate the effect of compression between plates.

Key words: isostatic gravity anomaly; tectonic stress; plate movement