

雁行褶皱构造型式的解析理论及实验的探讨

黄 庆 华

(地质科学院地质力学研究所)

摘 要

地壳上出现的雁行褶皱构造型式,可以用数学-力学分析及模型试验来说明它的成因。本文运用平面稳定理论讨论了一理想长条形地块,在剪力作用下的稳定问题。这样的一个理想长条形地块在平面扭动下发生的弹性弯曲,可以用一种力学模型来描述。从计算结果得出的等挠度线及褶皱的形态分布与野外观测的构造线及构造等高线的形态分布非常相似,文中还从模型试验扼要地讨论了形成雁行褶皱的应力场。

一、引 言

在地壳上部许多构造形象中,往往可以区分出这样一类褶皱群,它们彼此相互错列,好似飞雁队行。对于这类构造现象所进行的野外地质观察,岩石移动的方向常常清楚地指明,它是由于岩石作相对扭动所产生。因此,这种褶皱群就被称为雁行形扭动构造。

李四光同志经过长期的野外观测,根据应力-应变分析,在1929年提出了地块扭动理论^[1]。此后又在旋卷构造及其他有关中国西北部大地构造体系复合问题一文中作了详细的阐述^[2]。

从连续介质力学的观念来说,当一个物体作为一个整体发生机械运动的时候,它的运动一般包括平移、扭动和转动三个部分,这一规律对于地块或岩块的运动来说也仍然是应该遵守的。

因此,当一个地块或岩块在与其毗连的岩石作相对扭动或转动时,由于这种运动是在弥满岩石的空间进行的,那就不可避免的会在一定空间引起形变。而由此发生的形变不会不遵守一定的变形规律。更为重要的事实是某些有用矿物的运移和富集经常与这种形变系统有着亲密的联系。这样,岩块变形规律性的研究,并不只是由于它们本身仅仅存在某种形式上的规律而被提出的。

根据上述情况,在下面我们举出几个雁行形构造的实例作为探讨的开端,并试图从力学的观点对它的成因作出一个初步的分析,这是一种新的尝试。由于地壳形变控制因素的复杂性及变形的长期性在讨论中我们没有过多的期望将所有的问題都进行到彻底的程度。此外,在数学处理中,对于地壳平面弯曲的数学表达式亦是比较复杂的,特别是要用数学力学模型来描述自然界的地质现象——雁行褶皱的几何形式,在处理上就更加困难,因此对它的数学解答只

能是近似的。

二、几个雁行褶皱构造型式的实例

雁行褶皱构造型式,在世界各地不同时代的地层中经常可以见到,有些地区雁行褶皱构造发育得特别完美。

我国柴达木盆地地区所显示的构造特征,便是这类构造型式的一个良好实例。对于这个盆地的构造特征,孙殿卿等已经作了详细的描述^[4]。从图 1 中可以清楚的看到,这个盆地的西部出现有许多完美的雁行排列的构造型式或近似雁行排列的构造型式,发育较好的雁行状构

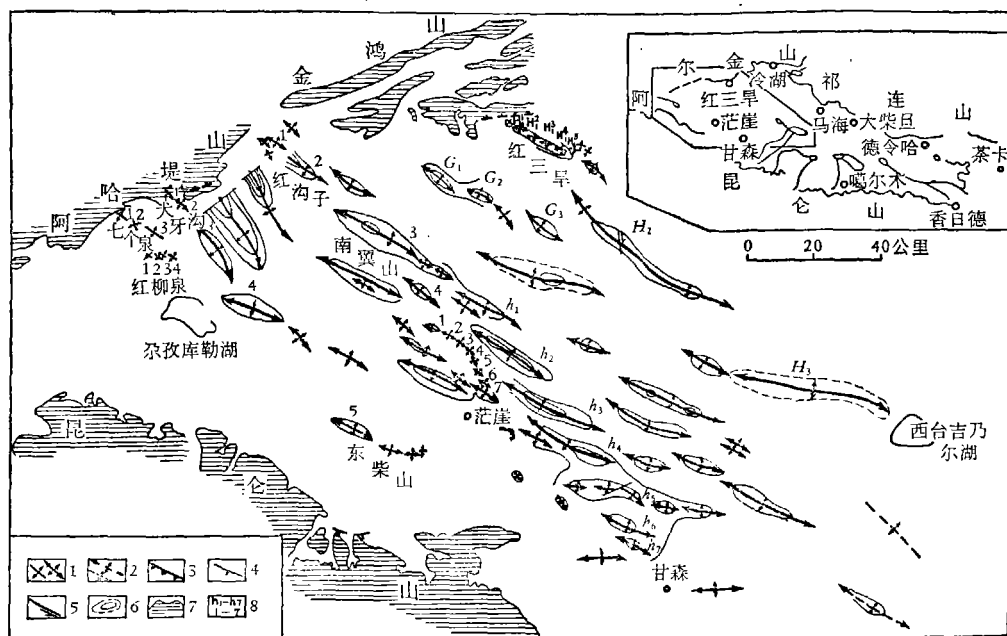


图 1 柴达木盆地西部构造线图^[4]

1——新生界背斜轴； 2——推测新生界背斜轴； 3——冲断层； 4——正断层； 5——平移断层；
6——地层圈闭线,虚线示推测部分； 7——盆地边缘山脉； 8——背斜排列组及背斜编号

造型式,出现在黄瓜梁-甘森、七个泉、红柳泉等地。在黄瓜梁-甘森一带有七个由第三纪地层构成的背斜(图 2, h_1-h_7)。 h_1-h_7 各背斜轴向为北 $50^\circ-60^\circ$ 西,由西北而东南,依次向西南斜列关于上述几个雁行排列构造的成因问题,孙殿卿等应用应力应变分析方法及该区的地质资料已经作了初步的解释。认为柴达木盆地出现的雁行构造型式是与柴达木盆地和它的边缘当时发生的相对扭动分不开的。

作为另一个雁行构造型式控制石油分布的实例,可以从苏联费尔干纳乌卡特(Наукат)盆地的构造特征得到说明。这个盆地位于克奇卡拉(хр. кичикалай)、基兹尔-昆盖(Кизыл-Кунгей)、阿克达石(Акташ)及卡达拉(Катара)等古生代地块之间,盆地西边向着别里-乌柳克(Бель-Урюк)地区圈闭,东边向达勒得克(Талдык)构造洼地撒开,这

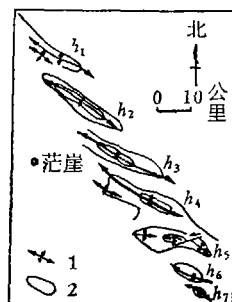


图 2 黄瓜梁-甘森地区背斜排列形式图^[4]

1——背斜轴；
2——地层圈闭线

里主要分布着新第三纪地层,只在克兹勒-昆盖及阿克达石古生代地块的上部有中生代和老第三纪地层出露。

按照 С. Н. Симаков 等人的报道^[8], 这些地层组成了一个巨大的背斜, 并被巴依斯卡 (Баишская) (40)、波罗犹斯卡 (Бордюсская) (50)、德雅斯卡 (Джашская) (64)、大肯勒可里斯卡 (Большая Кырккольская) (129)、小肯勒可里斯卡 (Малая Кырккольская) (130)、帕潘斯卡 (Папанская) (152) 及恰奇明斯卡 (Чачминская) (211) 等短轴背斜复杂化。其中有四个背斜 (152, 129, 40, 211) 系向西南斜列而向东南错移, 构成一个作北东东向排列的雁行形构造 (图 3)。

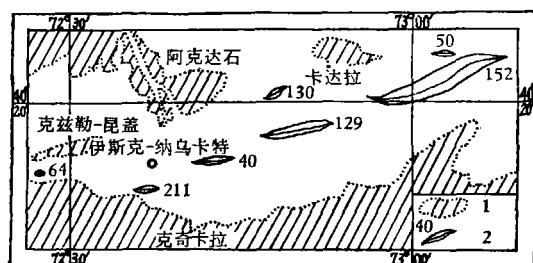


图 3 纳乌卡特背斜组^[8]
1——古生代地块; 2——背斜构造

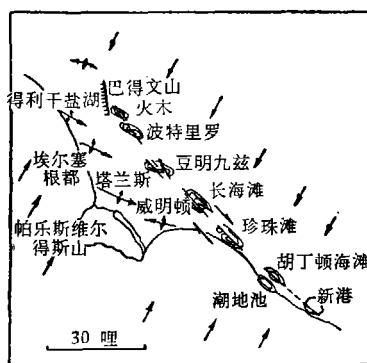


图 4 南加利福尼亚州新港-火木带构造纲要图^[9]

北美洛杉矶盆地地区显示的构造特征, 也是这类构造型式的一个良好的例子。从 L. U. De Sitter 引用的构造图 (图 4) 可以看到, 在这一盆地新港-火木间的狭长地带出现七个短轴背斜, 它们系向东南斜列而向西南错移, 构成雁行形态。自西北而东南分别为火木背斜、波特里罗背斜、豆明九兹背斜、长海滩背斜、珍珠滩背斜、胡丁顿海滩背斜、新港背斜。这些背斜的轴线均为北西方向。

上述的现象表明洛杉矶盆地东北和西南部的岩层当时发生了顺时针的水平相对扭动。在第三、四节的理论分析和实验中我们将会看到, 由于存在有这一方面的水平扭动, 必然会产生一种与这种扭动相适应的应力场及形变场。洛杉矶盆地新港-火木间雁行褶皱的形成是与其所处的这种环境紧密相连的。

三、雁行褶皱构造型式的力学模型

为了讨论本文所提出的问题, 我们采用各向同性和均匀连续的假定, 并在地壳上取一理想地块, 它的厚度 (h) 小于长度 (L) 和宽度 (b) (即一带形的理想地块), 地块表面与大气接触, 底面与下伏的弹性地层接触。由于某种显而易见的理由, 我们将不考虑重力对它所引起的效应。

在上述前提下, 我们从讨论地块的平衡 (运动) 着手, 当地块遭受某一数值的剪力时, 为了达到稳定的平衡会引起一定形式的挠曲。其挠度函数 $W(x, y)$ 满足下列方程:

$$D \left(\frac{\partial^4 W}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 W}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 W}{\partial y^4} \right) - 2N_{xy} \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} + KW = 0. \quad (1)$$

式中所标出的符号 x, y 为直角坐标, D 是地块的抗弯刚度 ($D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$, E 为地块的弹

性常数, ν 是波桑比), N_{xy} 为在地块平面内承受的侧向剪力, K 是地块下伏岩层的比例系数。

对于方程式 (1) 若能寻找出一个解答, 则对于我们讨论的问题来说是有其重要意义的。在构造力学及宇宙地质学所包括的若干问题中, 研究者们曾经建立不同类型的微分方程式来寻求这类方程式在所讨论问题中的解式。李四光同志在山字型构造的理论和实验研究一文中, 曾经在双调和方程式处理下提出了这种方程在该讨论问题中的应力函数解式, 由此得到的应力分布与在野外出现的山字型所显示的应力分布是非常符合的。M. B. Стовас 在分析地球表面协和山脉的成因时, 也曾经运用拉普拉斯方程式提出了这种方程在该讨论问题中的协和函数解式。按照上述情况, 我们把这样一种理想地块的挠度的解式写成为:

$$W = W_0 e^{\frac{x}{b}} [A_1 e^{i\lambda_1 \frac{y}{b}} + A_2 e^{i\lambda_2 \frac{y}{b}} + A_3 e^{i\lambda_3 \frac{y}{b}} + A_4 e^{i\lambda_4 \frac{y}{b}}], \quad (2)$$

其中 W_0 是理想地块原点的挠度, μ 为待定的实常数, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, A_1, A_2, A_3, A_4$ 为待定的复常数, 为了满足方程 (1), $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ 必须是下列 λ 的 4 次代数方程的四个根,

$$\lambda^4 + 2\mu^2 \lambda^2 + 2\mu s + \mu^4 + k = 0, \quad (3)$$

其中

$$s = \frac{b^2 N_{xy}}{D}, \quad k = \frac{b^4 K}{D}. \quad (4)$$

在整个讨论问题里, 重要的是对于在实际的地质环境中可能存在的边界条件形式的分析。可以设想到, 当某一地块发生扭动或与其周围岩石发生相对扭动时, 由于这种扭动在岩石中引起的形变, 在任何情况下总是只能限于一个有限的范围, 而在这一范围以外的地区, 由这种扭动在岩石中所引起的形变逐渐消失, 因此我们认为当地块扭动时外围岩石仍处在稳定状态。这种相对稳定状态也可以由增加边界上岩层厚度或刚度来保证, 故应有如下的边界条件:

$$W(y = \pm b) = 0, \quad \frac{\partial W}{\partial y}(y = \pm b) = 0, \quad (5)$$

显然这只能被我们近似地接受。

从解式 (2) 可以看出, 为了使它满足边界条件 (5), 它必须有

$$\left. \begin{aligned} A_1 e^{i\lambda_1} + A_2 e^{i\lambda_2} + A_3 e^{i\lambda_3} + A_4 e^{i\lambda_4} &= 0, \\ A_1 e^{-i\lambda_1} + A_2 e^{-i\lambda_2} + A_3 e^{-i\lambda_3} + A_4 e^{-i\lambda_4} &= 0, \\ A_1 \lambda_1 e^{i\lambda_1} + A_2 \lambda_2 e^{i\lambda_2} + A_3 \lambda_3 e^{i\lambda_3} + A_4 \lambda_4 e^{i\lambda_4} &= 0, \\ A_1 \lambda_1 e^{-i\lambda_1} + A_2 \lambda_2 e^{-i\lambda_2} + A_3 \lambda_3 e^{-i\lambda_3} + A_4 \lambda_4 e^{-i\lambda_4} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

而根据 W_0 的定义应该有

$$A_1 + A_2 + A_3 + A_4 = 1, \quad (7)$$

因为 A_1, A_2, A_3, A_4 不同时等于零, 所以从方程式 (6) 有

$$\begin{vmatrix} e^{i\lambda_1} & e^{i\lambda_2} & e^{i\lambda_3} & e^{i\lambda_4} \\ e^{-i\lambda_1} & e^{-i\lambda_2} & e^{-i\lambda_3} & e^{-i\lambda_4} \\ \lambda_1 e^{i\lambda_1} & \lambda_2 e^{i\lambda_2} & \lambda_3 e^{i\lambda_3} & \lambda_4 e^{i\lambda_4} \\ \lambda_1 e^{-i\lambda_1} & \lambda_2 e^{-i\lambda_2} & \lambda_3 e^{-i\lambda_3} & \lambda_4 e^{-i\lambda_4} \end{vmatrix} = 0.$$

展开这个行列式, 得到

$$\begin{aligned} &(\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_4) \sin(\lambda_1 - \lambda_2) \sin(\lambda_3 - \lambda_4) \\ &- (\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_4) \sin(\lambda_1 - \lambda_3) \sin(\lambda_2 - \lambda_4) = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

从方程式(3), (8)便可以确定出对应于某一应力的变形值。

现在来确定与变形有关的几个系数, 根据方程(6)的前三个及(8)式, 可得到

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= \frac{D_1}{D_1 + D_2 + D_3 + D_4}, & A_2 &= \frac{D_2}{D_1 + D_2 + D_3 + D_4}, \\ A_3 &= \frac{D_3}{D_1 + D_2 + D_3 + D_4}, & A_4 &= \frac{D_4}{D_1 + D_2 + D_3 + D_4} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

其中

$$\begin{aligned} D_1 &= \lambda_2 e^{i\lambda_1} \sin(\lambda_4 - \lambda_3) + \lambda_3 e^{i\lambda_3} \sin(\lambda_2 - \lambda_4) + \lambda_4 e^{i\lambda_4} \sin(\lambda_3 - \lambda_1), \\ D_2 &= \lambda_1 e^{i\lambda_1} \sin(\lambda_3 - \lambda_4) + \lambda_3 e^{i\lambda_3} \sin(\lambda_4 - \lambda_1) + \lambda_4 e^{i\lambda_4} \sin(\lambda_1 - \lambda_3), \\ D_3 &= \lambda_1 e^{i\lambda_1} \sin(\lambda_4 - \lambda_2) + \lambda_2 e^{i\lambda_2} \sin(\lambda_1 - \lambda_4) + \lambda_4 e^{i\lambda_4} \sin(\lambda_2 - \lambda_1), \\ D_4 &= \lambda_1 e^{i\lambda_1} \sin(\lambda_2 - \lambda_3) + \lambda_2 e^{i\lambda_2} \sin(\lambda_3 - \lambda_1) + \lambda_3 e^{i\lambda_3} \sin(\lambda_1 - \lambda_2). \end{aligned}$$

为了数学计算方便起见, 下面我们把一些必要的公式写成实数的形式。从方程(3)可以看到, λ 的四个根满足条件

$$\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 = 0.$$

另外, 通过计算表明, λ 有两个负的实数根和一对共轭的复数根, 因此我们可以设:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_1 &= -\alpha - \beta, & \lambda_2 &= -\alpha + \beta, \\ \lambda_3 &= \alpha + \eta i, & \lambda_4 &= \alpha - \eta i. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

这样, 再利用根与系数的关系, 从方程(3)可得到

$$\left. \begin{aligned} 2\alpha^2 + \beta - \eta^2 + 2\mu &= 0, \\ \alpha(\beta^2 - \eta^2) - \mu s &= 0, \\ (\alpha^2 - \beta^2)(\alpha^2 + \eta^2) - \mu^4 - k &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

再将算式(10)代入(8)式, 化简后得到

$$2\beta\eta(\cos 2\beta \operatorname{ch} 2\eta - \cos 4\alpha) - (4\alpha^2 - \beta + \eta^2) \sin 2\beta \operatorname{sh} 2\eta = 0. \quad (12)$$

从方程(11), (12)可求得几种 k 值的 $\alpha, \beta, \eta, s, \mu$ 的数值, 这些数值的一部分数据列于表 1。

表 1

k	α	β	η	s	μ
0	1.9616	1.8059	4.2590	22.152	1.895
12	2.0935	1.7886	4.4996	24.197	2.035

点的位 置 (x, y) 及 隆 起 (W)

x	722	658	791
y	000	000	000
W	199	999	997
x	760	640	937
y	464	469	717
W	199	999	996
x	798	072	695
y	933	384	853
W	199	999	996

最后从(2)式便可以得到这一理想地块在扭动情况下各点的挠度。当把若干相同的挠度值的点连成曲线时,则得到了等挠度线,即平面变形的等挠曲线。这些具有特征形象的曲线示于图 5。图中曲线旁的阿拉伯字表示垂直于 x, y 平面相对于座标原点处的挠度比值。可以看到,在整个场中由等挠度线组成的三个完整的褶皱的形状和分布规律完全一样。每一褶皱的轴线与剪力方向的夹角 θ 约为 34° 。两褶皱中心的连线与剪力平行,褶皱中心之间的距离 $l = 0.8b$ 。所得的结果说明,由上述力学模型所决定的平面挠曲具有明显的相互错列的形式,这与柴达木盆地等地区出现的雁行构造型式的形态特征是完全一致的。

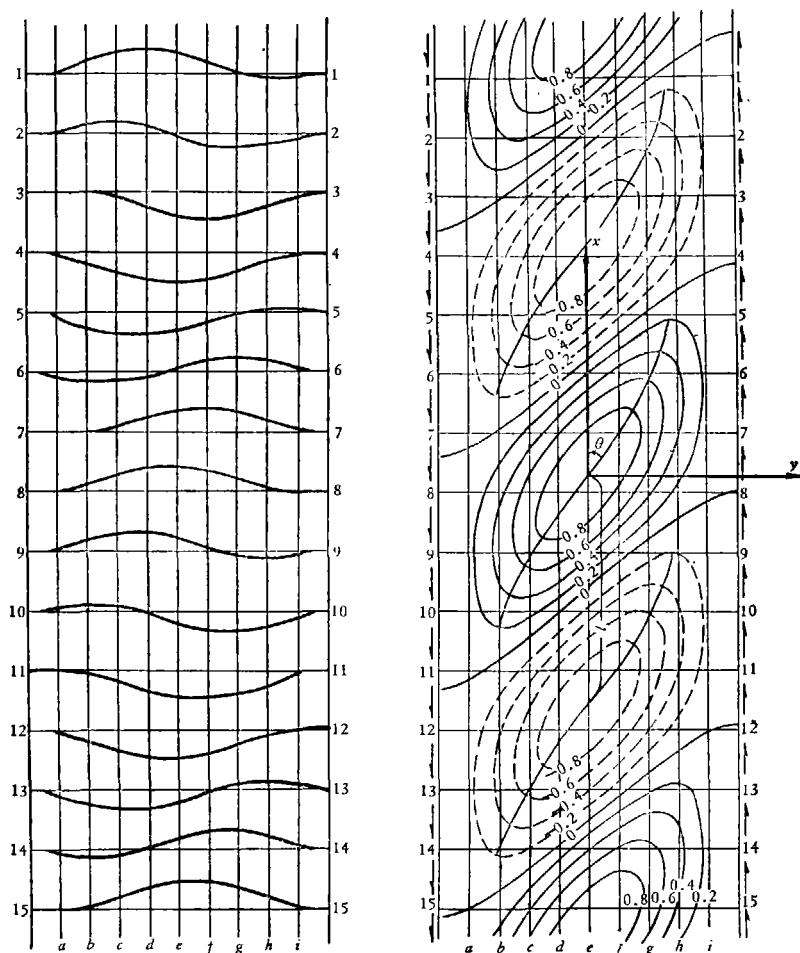


图 5 带形理想地块在剪力作用下的褶曲分布形态(褶皱呈明显的雁行排列)

上面我们在用解析理论处理地块表面挠曲形态时,把自然界的地块视为一种理想的弹性地块,且研究它在最小应力下变形的规律。事实上自然界中地块的挠曲状态是与一种流变性物质的运动状态有关。然而我们对这种介质运动的基本理论还很少研究,以及它在数学处理上还存在一些困难,因此目前宜将地块当作弹性物体看待,作为对上述问题的第一级近似讨论。

下面我们顺便讨论一下边界条件问题,这是用分析理论研究地壳形变状态的一个必然步

骤。在解析理论意义下,地块的形变状态是与地块边界面包围的几何形状以及这一边界面上力的分布强度分不开的,这可以从下面几个理想地块的变形图象得到了解。首先让我们看一看 g (理想地块的几何形状,即矩形理想地块的长宽比)与参数 θ, l 的关系。图 6—8 是几种不同几何形状的理想地块在对应于它们的最小剪力下的挠度等值线的分布形态。不难看出,它们与图 5 中的挠度等值线分布形态,虽然在总体规律上有些类似,但各个细节特征则仍有不小的差别。这首先表现在无论褶皱的褶曲程度或褶皱轴的方位还是各褶皱中心连线的距离及连线的方位都并不是完全一致的。其中图 7 为 $\frac{L}{b} = 1.5$ 的理想地块的挠度等值线分布形态,在那里分布的三个褶皱,它们的褶曲程度互不相等,各褶皱顶点的连线的方向并不与剪力平行,而是向着 $-y$ 轴偏转了一个不小的角度。在这种情况下被确定出的两个参数是 $\theta = \angle 39^\circ$, $l = 0.46b$ 。图 8 是 $\frac{L}{b} = 1$ 的理想地块的挠度等值线分布形态。很容易看出,在整个场中出现的三个褶皱,它们的褶曲程度也都不是相等的,褶皱中心的连线的方位是愈朝 $-y$ 轴偏转了,而参数 θ, l 的数值也跟着发生了变化 ($\theta = \angle 45^\circ$, $l = 0.37b$)。

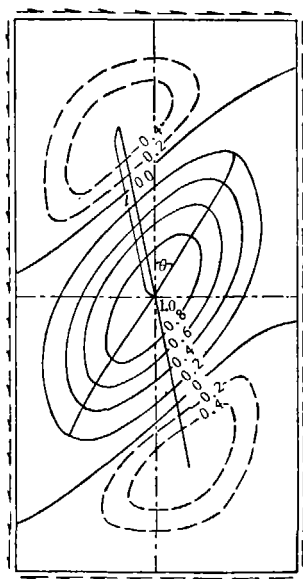


图 6 $\frac{L}{b} = 2$ 的理想地块在剪力作用下的褶曲分布形态

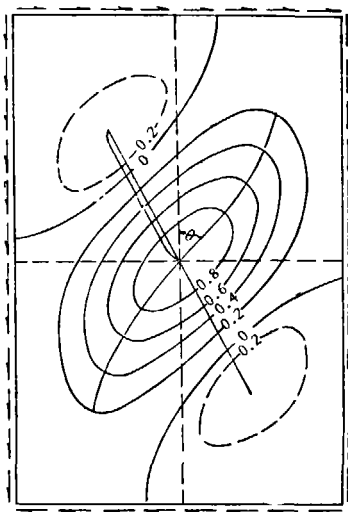


图 7 $\frac{L}{b} = 1.5$ 的理想地块在剪力作用下的褶曲分布形态

其次让我们看一看由于边界力 (s) 的变化给地块变形特征带来的影响。图 9—11 是几何边界相同的理想地块在不同边界力作用下的变形图象,分布在三个场中的等挠度线,除了在场的中央等同以外,在靠近它的短边边界的地方则仍有不小的差别,况且场中央的那个由等挠度线组成的褶皱,它的轴线方位也并不是互相一致的,而是随着 s 的增加 θ 被减小了。

由上述讨论可以引出如下的一个推论,就是说当地块受力的方向不变时,如果边界面所包围的地块形态发生变化或者边界面上力发生变更,都将直接影响着这一地块内的形变分布以及由此而产生的构造线方向的变动。李四光同志很早以前就提出了这个问题,他指出:“作为

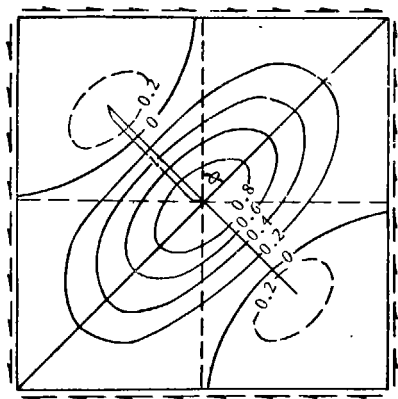


图 8 正方形的理想地块在剪力作用下的褶曲分布形态

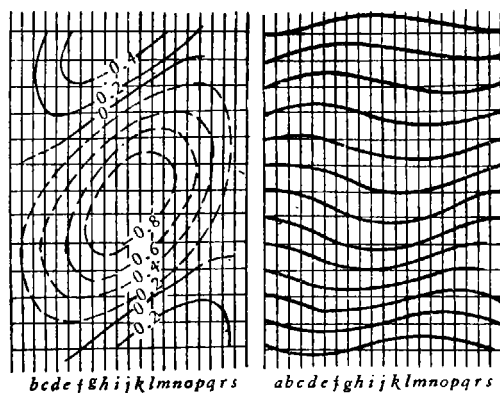


图 9 矩形理想地块在边界力 $s = 4.8$ 时的褶曲度及褶曲分布形态

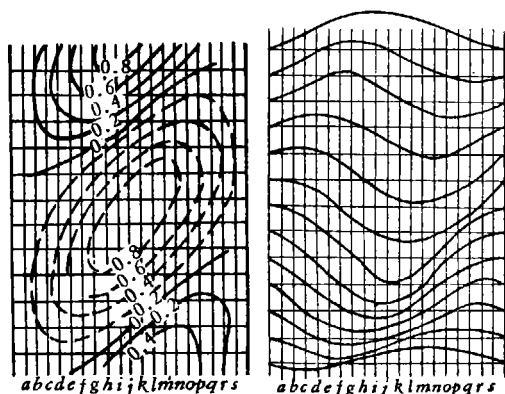


图 10 矩形理想地块在边界力 $s = 5.4$ 时的褶曲度及褶曲分布形态

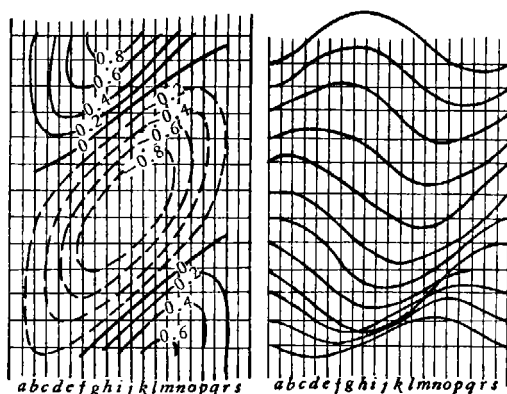


图 11 矩形理想地块在边界力 $s = 6$ 时的褶曲度及褶曲分布形态
(根据 Von. Skikazo)

整个大地构造区域的成员的若干重要局部地块,在它们的构造形态乃至岩石质地方面,发生了重大变化的时候,例如大规模变质岩区的形成,或大小地块分裂等等,那些重新组成的或分裂出来的地块,各个作为一个整体的质量中心(重心),必然与原来的地块的质量中心不相符合,而沿着它们的边缘所创造的新的边缘条件,必然要求在按照那个边缘所划定的地块中重新建立应力分配体系,才能保持稳定;即使当地地壳运动的方向不变,这种变化,仍然是不可避免的。”因此,参数 θ , l 变化规律性的研究,对于推断构造型式展布地区的边界条件,从而确定那一地区的运动方式来说是颇富有重要性的。

四、雁行褶皱构造型式的应力模型实验

在近似上述力学模型的情况下,我们作了一种光弹性模型实验,研究雁行构造的应力场。这一应力模型实验是在光测弹性力学试验机上完成的。试验时选用了两种不同力学性质的材料作模型,其一是用甘油、明胶、水浇注成矩形板状模型,将模型的长边分别粘在两根带齿痕的木条上,短边为自由边,把砝码挂于任意一根木条上,使模型承受剪力。另一是用赛璐璐板铸成

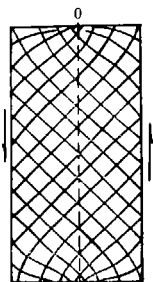


图 12 赛路璐板在剪力作用下 ($\omega = 0$) 的主应力轨迹线

矩形模型,将模型安装在固定的加力架上,并在它中间的固定铁条上悬挂砝码或采用其他加力措施,这样在中间固定块上作用着拉力,而同样大的力分布在模型的两边使模型作用着剪力。由于模型是被置于正交偏光场中,受力模型在映幕上将会产生暂时干涉现象,如果将这些干涉图案(等色线、等倾线)摄影或描绘,即可确定模型各点的主应力值及主应力方向。当把主方向连续改变的各点连结时,便得到了主应力迹线。这一实验的结果已列在图 12 中。可以清楚的看出,由这种应力场所决定的平面形变分布与野外出现的雁行褶皱和由上述力学模型所确定的理论挠度分布,在总体规律上是完全吻合的。

上述的理论解析及实验结果说明,地壳上的水平应力显然是产生这类构造型式的主要原因。

五、结 论

1. 本文用解析理论及偏光实验方法,对地壳上出现的雁行褶皱构造型式的力学成因作了初步的探讨。从而表明在构造地质学中存在有引用和发展力学、数学分析的可能性。(虽然用解析方法来研究构造变形的规律性和应力活动方式,在讨论中会遇到许多复杂的问题,可是它仍然是研究构造型式起源的一种有力手段。)

2. 文中的理论分析和实验对我们讨论的问题的答复是一致的,也就是说,出现于地壳上的雁行构造型式是具有弹、塑性的地块遭受扭动的结果。因而我们引出了表征雁行褶皱构造型式成因的力学模型。

3. 我们简要地讨论了几种形状的理想地块的变形特征,它说明当地块受力方向不变时,变形的几何形式是地块几何边界和边界力的函数。这一事实对自然界那些迄今已知的、形态分布不尽相同的雁行褶皱构造型式的解析无疑会给予有力的帮助。

4. 根据平面稳定性理论,来研究地块的变形规律,对于了解地壳应力活动方式、部署工程建设及资源普查勘探工作,都具有重要的意义。

参 考 文 献

- [1] 李四光,地质力学之基础与方法,1947.
- [2] 李四光,旋卷和一般扭动构造及地质构造体系复合问题,第一辑,1958年再版.
- [3] 李四光,地质力学概论,科学出版社,1974.
- [4] 孙殿卿等,旋卷和一般扭动构造及地质构造体系复合问题,第二辑,13—36,科学出版社,1958.
- [5] L. U. De Sitter, 1964, 构造地质学.
- [6] Timoshenko, S. Theory of Elastic Stability (中译本), 科学出版社, 1958.
- [7] М. М. 弗罗赫特, 1964, 光测弹性力学, 第 I 册.
- [8] Симаков С. Н. и др., Геологическое строение и нефтеносность Ферганы., 1957.
- [9] Lee, J. S., Soc. Rec. Acad. Sin., 1 (1945), 3—4.
- [10] Currie, J. B., Patnode, H. W. & Trum, R. P., Geological Society of America Bulletin, 73 (1962), 6.
- [11] István Szabó, Höhere Technische Mechanik, 1958.
- [12] Bollenrath, F. Aachen, Ausbeul scheinungen an ebenen, auf schub beanspruchten platten, Luftfahr forschung, 1926—1930, Band. 6.
- [13] Jardetzky, W., Bewehrungsmechanismus der erdkruste, 1948.