

变形构造分析的定量化与摩尔圆的引用与发展

刘瑞珣¹ 吕古贤² 王方正³ 正世锋¹

(1. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; 2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;
3. 中国地质大学, 湖北 武汉 430074)

摘要: 20 世纪 60 年代, 与板块构造学说建立的同时, 在构造地质学中还有一项革新, 就是变形构造分析的定量化, 从定性描述走向定量计算。定量化的重要标志就是将力学中的摩尔圆引入构造地质学, 并且使其改进和发展, 在构造地质分析中建立了有限应变摩尔圆, 适应了大变形的分析, 又建立了极摩尔圆, 适应一般剪切的分析。我国地质学家在其中也做出了自己的贡献。

关键词: 变形构造分析; 摩尔圆; 有限应变摩尔圆; 极摩尔圆; 一般剪切

中图分类号: P551 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3657(2003)02-0120-03

20 世纪 60 年代是地质学大变革时期, 其主要标志就是板块构造学说的建立。与此同时还有另一项变革, 就是变形构造分析的定量化, 它的标志就是摩尔圆的引用。板块学说的建立对整个地球科学有重大影响, 变形构造分析虽然没有那么大的影响, 但在构造地质学里却是具有里程碑的意义, 使构造地质学从定性描述走向定量计算。极为有趣的是板块构造与变形构造各自所依据的假设是完全对立的, 然而两者在描述地质问题时又是统一的, 反映了地球科学中矛盾统一的一个重要例证。

板块构造理论假设地壳和上地幔岩石圈是刚体。刚体是力学中对不变形体的抽象。用刚体假设来描述板块运动是很精确的, 这可以由各板块拼合后缝合率达 90% 来证明。如果各大板块在 2 亿年间从裂解到分离过程中有明显的变形, 那么今天的板块就不会拼成如此完美的原型。资料表明, 海面以下 500 m 的大陆轮廓的缝合率还要高, 说明 2 亿年过程中海水进退对海陆轮廓略有影响, 但对板块轮廓没有影响。板块理论合理地解释了俯冲带、洋脊扩张, 转换断层, 磁异常带等重要事实。

变形构造理论假设岩石和岩石圈是大变形体, 变形后当外力撤去时, 变形并不恢复, 力学中抽象为塑性。用变形体描述大规模褶皱、剪切带和推覆构造也是相当精确的。由于岩石变形使得板内各构造单元不能完全复位, 所以不搞清楚变形过程几乎不可能恢复原始的构造格局, 所以变形构造分析成了

构造地质学发展强劲的领域。同时也说明, 对岩石作不变形的刚体假设和大变形的塑性和流变性假设 (考虑时间因素时), 看来虽然是矛盾的, 事实上却是完全合理的, 在实际地质体的研究中是统一的。

1 摩尔圆的引入

摩尔圆 (Mohr circle) 是奥地利物理学家和工程师 Otto Mohr 于 1882 年导出的。受力物体内一点及其附近各方向内截面上的正应力和剪应力的表达式分别为:

$$\sigma_n = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\theta \quad (1)$$

$$\tau_n = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sin 2\theta \quad (2)$$

式中 σ_n 和 τ_n 分别为 n 截面上的正应力和剪应力, σ_1 和 σ_2 分别为两个主应力, θ 为 n 截面与最大主应力 σ_1 的作用面间法线夹角。Mohr 将上两式移项, 平方, 相加, 得到一个圆的方程式:

$$\left[\sigma_n - \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \right]^2 + \tau_n^2 = \left[\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \right]^2 \quad (3)$$

这个圆的圆心出现在横坐标轴 σ_n 上, τ_n 为纵坐标轴。圆心坐标为 $(\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}, 0)$, 半径为 $\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}$ 。这个圆称为应力摩尔圆, 由于应力与应变有对应关系, 所以一点及其附近各方向的线应变和剪应变也有圆的关系, 即:

收稿日期: 2003-01-20; 改回日期: 2003-02-25

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目 (KZCX2-5W-119); 国土资源部地质大调查项目 (DKD2001028); 国家自然科学基金项目 (49972080, 40172074) 资助。

作者简介: 刘瑞珣, 男, 1938 年生, 教授, 博士生导师, 从事构造地质及显微构造教学与研究; E-mail: Liuruiyun@pku.edu.cn。

$$\left[\varepsilon_n - \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} \right]^2 + \left[\frac{\gamma_n}{2} \right]^2 = \left[\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{2} \right]^2 \quad (4)$$

无论应力摩尔圆, 还是应变摩尔圆都只适用小变形条件, 不适用大变形条件。在脆性破裂发生断裂的力学机制研究中, 李四光^[1]引用了摩尔圆和摩尔包络线, 并考虑了三维摩尔破裂准则。在此以前与地质有关的领域只有岩石力学和工程力学中引用过摩尔圆, 李四光是第一位把这个力学方法引入地质学分析的地质学家。脆性在力学上是指受力物体发生变形很小时就破裂的性质。岩石在通常条件下, 具有脆性, 破开的岩石拼接起来几乎和破裂前的尺寸一样, 说明破裂前的受力过程几乎没有留下永久变形, 所以李四光引用应力摩尔圆解释脆性破裂条件, 不仅是率先的, 而且是恰当的。在地质作用条件下, 岩石却可以产生大变形而不破裂, 或者破裂发生在大变形之后并把大变形保留下来而不恢复, 力学中定义为韧性。在研究岩石的韧性变形构造时(例如韧性剪切带), 应力摩尔圆和应变摩尔圆都不适用。面对大变形地质现象, 在李四光引述应力摩尔圆以后差不多 20 年里, 构造地质学并没发生质的变革。

2 有限应变摩尔圆的建立

构造地质学质的变革是有限应变摩尔圆建立后发生的。有限应变摩尔圆(finite strain Mohr circle)是 Ramsay^[2]把应变摩尔圆改进后建立的。他抛开大变形中应力与应变的复杂关系, 只考虑变形后线应变与剪应变之间的关系, 以及这种关系随截面角度的变化。Ramsay 导出在大变形条件下线应变与剪应变也有摩尔圆的关系。对应小变形和无限小应变的概念, 大变形是小应变的有限次积累的结果, 称为有限应变摩尔圆, 它的表达式与(1)、(2)式有相似的形式, 为:

$$\lambda = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2} + \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{2} \cos 2\theta \quad (5)$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{\lambda_1 \lambda_2}} \cdot \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{2} \sin 2\theta \quad (6)$$

移项后平方, 两式相加, 以同样方式消掉三角函数项, 又得到一个圆的方程, 表示如下:

$$\left[\lambda - \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2} \right]^2 + \lambda_1 \lambda_2 \gamma^2 = \left[\frac{\lambda_1 - \lambda_2}{2} \right]^2 \quad (7)$$

式中 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda$, 分别为两个主应变和 n 方向的线应变, γ 为剪应变。有限应变中的线应变表示法有些特殊, 这里 $\lambda = (1 + \varepsilon)^2$, 称为平方长度比(quadratic elongation), 同时, 表示剪应变的纵坐标轴也有线应变成分。这些特殊点完全是为了建立圆的方程而移项引起的, 但移项的结果却使得繁杂的三角函数的方程计算简化为几何图解计算。但是这里需要注意, (5)、(6)两式中的 θ 角是代表变形前某一截面法线与第一主应变截面的夹角, 经过大变形之后, θ 角发生了明显变化, 在地质露头上 θ 角往往测不到, 而只能测到变形后的角 θ' , 所以(5)、(6)式以及由(7)式建立的摩尔圆并不能方便的使用(小变形条件下可看成 $\theta' = \theta$, 误差可忽略, 所以不存在这

个问题)。为了使用方便, Ramsay 又提出改进的方案, 为了让 θ' 也进入圆的方程, 采用平方长度比的倒数比较方便, 令 $\lambda' = \frac{1}{\lambda}$, $\gamma' = \frac{\gamma}{\lambda}$, 于是得到:

$$\lambda' = \frac{\lambda'_1 + \lambda'_2}{2} + \frac{\lambda'_1 - \lambda'_2}{2} \cos 2\theta' \quad (8)$$

$$\gamma' = \frac{\lambda'_1 + \lambda'_2}{2} + \sin 2\theta' \quad (9)$$

再通过同样的操作也得出圆的方程, 在此就不列出来了。需提醒的是公式中的 $\lambda'_1 < \lambda'_2$, 因为大数的倒数比小数的倒数要小。所以(8)式的第二项是负值, 为了使(9)式保持正值形式, λ'_1 与 λ'_2 互换了位置, 这样有限应变摩尔圆就实用了。

自从有限应变摩尔圆作图法建立以来, 变形构造就进入了定量分析阶段。针对不同的已知条件逐渐形成了 10 余种测量方法, 这些方法可以从变形的结果推算总的变形量, 在有条件时还可以推测变形的递进过程^[3]。并且运用这些方法在欧洲阿尔卑斯地区填出了变形构造地质图^[4], 使区域地质图中充实了变形分布信息。在 Ramsay 倡导和带动下欧洲和北美的其他地区也陆续开展了区域范围的应变测量工作, 从此, 构造变形成为构造地质领域中量化分析的核心领域, 减少了许多盲目性, 增强了分析的说服力。通过分析, 许多结果令人惊讶: 岩石竟能拉伸至原长的数百倍而不破裂, 这是大自然的杰作, 我们的实验室却远远达不到这样的结果。应变分析的结果也使许多构造中的疑难问题得到解决, 因而推动了构造地质学的发展。有些变形证据, 特别是递进变形的证据发生在显微尺度上, 从而也带动了显微构造的发展。

3 极摩尔圆的建立和改进

摩尔圆的原理是建立在纯剪切变形的基础上的, 简单剪切变形虽然也有一些测量方法, 但还不能简单地套用摩尔圆。纯剪切和简单剪切是一般剪切(general shear)的两个端元, 前者在变形的任意阶段, 变形椭圆的长、短轴只有长度变化, 没有方向变化, 而后者的长、短轴则长度和方向时刻都在变化。所以前者又称共轴应变或无旋转应变, 后者又称非共轴应变或旋转应变。而这两个端元在实际地质作用中出现的机率并不多。变形分析中视实际的变形靠近哪个端元就以该端元的测量代替, 但这是有误差的, 需要找到针对一般剪切的摩尔圆方法, 此事困扰了人们 20 多年。Simpson 和 De Paor 放弃直角坐标系, 采用极坐标系, 创立一种极摩尔圆方法^[5]。用极坐标表示射线的长度变化和角度变化比用直角坐标方便得多, 同时引用涡度(数学中又称旋量)概念描述有旋角的量, 这样极摩尔圆的方法就能够给出某个一般剪切中纯剪切和简单剪切各占多少比例。极摩尔圆方法的建立使构造变形分析又向前推进了, 原来不能测的实例变得可测, 使许多变形构造被定量地认识了。张进江等^[6]最先把极摩尔圆介绍到中国。

但是 Simpson 和 De Paor 的方法提出的可测条件较为苛刻: 要求已知变形前与剪切面垂直的标志线在变形后仍可测(长度和角度), 这在野外是不易找到的。实用中常把接近垂

直的标志线看作垂直的来用,这样虽然可测了,但精度却受到影响。张进江等^[6]改进了极摩尔圆方法,提出变形前与剪切面夹任意角(垂直或不垂直)的线性标志,只要变形后的数据可测,就可以实施极摩尔圆作图,并求出纯剪切和简单剪切各占多少。他们还利用自己的新方法测量了小秦岭韧性剪切带的变形量,他们把一般剪切的应变测量推进了一步。Simpson 和 De Paor 与张进江等的方法都要求变形过程中没有体积变化。如果有体积变化,他们的方法不适用。简单剪切和纯剪切两个端元的理论假设是没有体积变化的。因而一般剪切在理论上也假设没有体积变化,这样就要求极摩尔圆及其改进型应该适用所有的一般剪切。但是实际上变形的地质体常常发生压溶作用或大规模张性脉的充填,这就有物质的迁出或迁入,造成体积变化,有时变化大到不可忽略,所以需要针对体积变化再改进极摩尔圆方法。李海等^[7]又进一步改进了极摩尔圆,把体积变化考虑进去,提出新的极摩尔圆作图法,并将其用于新疆天山桑树园子剪切带的变形测量。于是极摩尔圆日趋完善。

总结:从将应力摩尔圆引入构造地质学^[1]至今已 50 多年,从有限应变摩尔圆的建立^[2]至今 30 多年,构造地质学发生质的变化主要在后 30 多年里。这个变化的明显标志就是基本结束了定性描述,进入了定量计算阶段。计算方法的核心就是摩尔圆原理在构造地质学中得到应用和发展,在有限应变摩尔圆建立之后,极摩尔圆的建立^[4]也具有里程碑的意义,从直角坐标到极坐标是思路上的飞跃,于是又有了中国学者对极摩尔圆的改进^[6-7]。摩尔圆在力学中不是新东西,已被广泛应用多年。将摩尔圆引入构造地质学是个创举,这个引入却只解释了一小部分问题,即适用范围有限,要适用于广泛的地质条件,就必须改进所借用的方法。地质学的理论、方法常常要依靠数学、物理、化学和生物学的理论、方法。依

靠并不是照搬,丰富和改进才更有生命力。随着近些年应变测量方法一步步地突破,构造地质学的研究理念和研究方法,一定会发生新的飞跃。

参考文献 (References):

- [1] 李四光. 地质力学之基础与方法 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1945.20~23.
Lee J S. Basis and Method of Geomechanics [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1945.20~23 (in Chinese).
- [2] Ramsay J G. Folding, Fracturing of Rock [M]. New York: McGraw Hill, 1967. 69~83.
- [3] Ramsay J G, Huber M I. The Techniques of Modern Structural Geology, 1 Strain Analysis [M]. London: Academic Press, 1983, 73~148, 200~276.
- [4] Simpson C, De Paor D G. Strain and kinematic analysis in general shear zones [J]. J. Struct. Geol., 1993, 15 (1) : 1~20.
- [5] 张进江, 郑亚东. 运动学涡度、极摩尔圆及其在剪切带定量分析中的应用 [J]. 地质力学学报, 1995, 1 (3) : 55~64.
Zhang Jinjiang, Zheng Yadong. Kinematic vorticity, polar Mohr circle and their application in quantitative analysis of general shear zones [J]. Journal of Geomechanics, 1995, 1 (3) : 55~64 (in Chinese with English abstract).
- [6] Zhang J and Zheng Y. Polar Mohr constructions for strain analysis in general shear zones [J]. J. Struct. Geol., 1997, 19 (5) : 745~748.
- [7] 李海, 郭召杰, 刘瑞珣, 等. 极 Mohr 圆在测量有体积变化剪切带剪切位移量中的应用 [J]. 中国科学 (D 辑), 2000, 30 (4) : 192~298.
Li Hai, Guo Zhaojie, Liu Ruixun, et al. Polar Mohr diagram method and its application in calculating the shear displacement of general shear zones with volume loss [J]. Science in China (Series D), 2000, 43 (2) : 151~157.

Quantitative analysis of the deformation structure and use and development of the Mohr circle

LIU Rui-xun¹, Lü Gu-xian², WANG Fang-zheng³, WANG Shi-feng¹

(1. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;

2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;

3. China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: Simultaneously with the founding of the hypothesis of plate tectonics in the 1960s, another revolution, i. e. quantification of deformation structure analysis instead of qualitative analysis, took place. The important marker of the quantification is the introduction of the Mohr circle construction from mechanics into structural geology and improvement and development of it. The finite strain Mohr circle has been established for the analysis of large deformation and the polar Mohr circle has also been established in order to adapt to general shear deformation. Chinese geologists have made their due contributions.

Key words: analysis of deformation structure; Mohr circle; finite strain Mohr circle; polar Mohr circle; general shear

英吉苏凹陷中—新生代构造特征及成因机制

李德伦 段吉业 梁桂香 单玄龙 程新民

(吉林大学地球科学学院, 吉林 长春 130061)

摘要: 英吉苏中生代凹陷是在古生代斜冲推覆构造背景之上发育起来的背驮式前陆盆地。盆地的沉积作用和变形作用严格受基底参与的斜冲断层的控制。中生代构造由北向南可划分 7 个带: 北部斜坡带; 群克—新开屏背斜带; 英北向斜带; 阿拉干背斜带; 英南向斜带; 古城墟斜坡带和罗布庄断凸带。叠瓦式逆冲断层、花状构造、构造三角带、断展褶皱和披覆构造是英吉苏凹陷的主要变形样式。自三叠纪以来, 不同时期的沉积中心自造山带向前陆方向迁移。中生界变形的动力学和运动学是与塔里木板块南缘活动大陆边缘的板块拼贴事件和壳内拆离缩短作用有关。

关键词: 斜冲断层; 披覆构造; 背驮式前陆盆地; 英吉苏凹陷

中图分类号: P546 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3657(2003)02-0123-07

英吉苏凹陷位于塔里木盆地东北部, 其北邻库鲁克塔格隆起, 南至罗布庄断凸, 西接满加尔凹陷, 东邻罗布泊, 总面积为 4.5 万 km²。

英吉苏凹陷是塔里木盆地研究程度较低的地区之一, 只完成过重磁普查, 北部露头区的地质调查和部分地区的二维地震工作, “九五”计划以来才开始进行大规模的地球物理勘测。英吉苏凹陷与库车凹陷同处于塔里木盆地北缘, 三叠纪以来, 具有类似的沉积—构造演化的历史, 都是主力生油岩——侏罗系的沉降中心。1995 年以来, 库车凹陷先后在克拉 2 井、依南 2 井等获高产工业油气流^[1], 塔里木人已于 2002 年 1 月 11 日在阿拉干背斜北带打出了高产油气流, 但英吉苏凹陷能否成为大油气田, 已是目前地质工作者关注的焦点。

1 区域地质概况

英吉苏凹陷是在古生代构造背景之上发育起来的上叠盆地。古生代晚期, 北部天山洋最终关闭, 碰撞后隆升, 形成古天山, 并向盆地内逆冲推覆。三叠纪开始, 英吉苏凹陷进入前陆盆地的演化阶段^[2], 沉

积了一套中生代磨拉石建造。

三叠系只分布在新开屏及其以东的山前断裂的下盘, 厚度为 1 500~3 000 m, 主要为一套三角洲相、湖泊相的砂泥岩夹煤层^①。中下侏罗统分布于孔雀河断裂和罗布庄断裂之间的凹陷带内, 厚度为 500~1 600 m, 主要为沼泽—滨浅湖—半深湖的煤系地层。白垩系在该区有广泛的分布, 厚度为 1 000 m, 主要为河流、滨浅湖相的砂砾岩、泥岩和膏岩。新近系与古近系的分布已扩展到罗布庄断裂以南, 并直接覆盖于前震旦纪结晶基底之上, 厚度为 2 000 m, 主要为河流、浅湖相砂砾岩、泥岩和膏岩。其中侏罗系与三叠系, 古近系—白垩系与侏罗系, 新近系与古近系为区域性角度不整合接触^[3]。

2 构造特征

2.1 构造分带

据侏罗系底界面埋深图, 英吉苏凹陷由北向南可划分 7 个构造带(图 1), 各构造带和局部构造特征见表 1。

2.2 斜冲断层

区内的斜冲断层主要有北西向和北东向两组。

收稿日期: 2002-04-20; 改回日期: 2002-12-25

基金项目: 国家“九五”重点科技攻关项目(96-111-03-06-02)资助。

作者简介: 李德伦, 男, 1947 年生, 教授, 从事构造地质学、区域地质的教学和科研工作。

① 据华北石油局勘探报告, 1998。

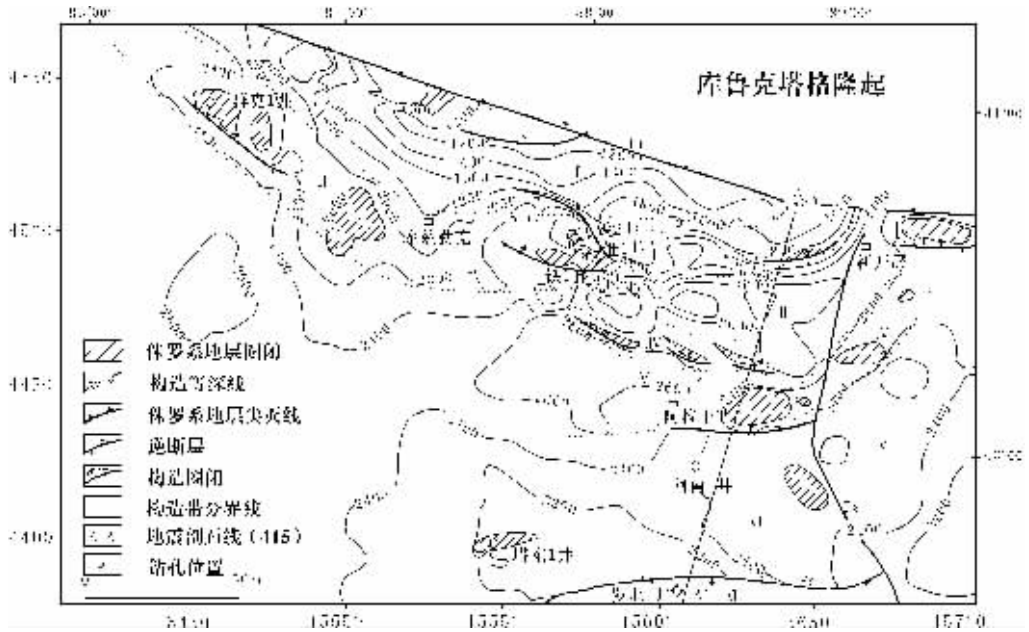


图1 英吉苏凹陷侏罗系底面埋深图(等值线单位:m)

I—北部斜坡带; II—群克—新开屏背斜带; III—英北向斜带; IV—阿拉干背斜带; V—英南向斜带; VI—古城墟斜坡带; VII—罗布庄断凸带;
 F₁—孔雀河断裂; F₂—罗布庄断裂; F₃—阿拉干东断裂; F₄—古城墟北缘断裂; F₅—罗布泊北缘断裂

Fig.1 Contour map of the bottom of the Jurassic of the Yingjisu depression

I—Northern slope belt; II—Qongkal—Xinkaiping anticlinal belt; III—Northern Yingjisu—syncline belt; IV—Arlagan anticlinal belt; V—Southern Yingjisu—synclinal belt; VI—Guchengxu slope belt; VII—Luobuzhuang fault uplift; F₁—Kongquehe fault; F₂—Luobuzhuang fault; F₃—Eastern Arlagan fault; F₄—Northern Guchengxiu marginal fault; F₅—Northern Luobubuo marginal fault

北西向断裂相对比较发育,分布于区内西北部,主要向北东倾斜;北东向断裂分布于区内东部和南部,主要向北西倾斜(图1)。据分析,断裂构造有如下特点:
 (1)断裂在北部区域比较发育,向南变少,并且断裂的强度由北向南逐渐减弱,反映区域应力作用方向是由北向南。(2)斜冲断层在平面上呈雁列式分布(图1),在剖面上呈正花状构造,组成两断夹一隆的“丫”字型,如群克构造、维马克构造、英南1井构造、铁南2井构造和阿拉干构造等,反映断层作用扭应力分量的存在(图2)。(3)断层产状呈上陡下缓的犁形,向北倾斜,剖面上组成叠瓦式构造,如孔雀河断裂、罗布泊北缘断裂、阿拉干背斜北带南缘断裂和古城墟北缘断裂。(4)断层向下切入前震旦纪结晶基底,归并于深部的滑脱层,以韧性变形为特征,库鲁克塔格兴地断裂糜棱岩的广泛出露已证实了这一结论;断层向上扩展到沉积盖层,除盆地北部边缘孔雀河断裂外,多数断层终止于侏罗系和白垩系,属于非突破性断层^[4]。(5)断层具有多期活动的特点,表现为:①

与断层伴生的古生代褶皱相对紧闭,多为断层传播褶皱,中生代褶皱开阔平缓,多为断展褶皱。②随着地层时代的变老,地层断距增大。③断层下降盘地层厚度大于上升盘。(6)对冲(构造三角带)构造是区内斜冲断层的另一种组合型式。区内的罗布庄断裂和古城墟北缘断裂为倾向相反的对冲断层,它们和基底滑脱层组成构造三角带,构成古生代的古城墟低凸和中、新生代的斜坡带。

2.3 披覆构造

披覆构造是由古剥蚀面以下的古隆起和古剥蚀面之上的披盖层构造两部分组成,形成上、下叠置、形态特征又迥然不同的构造组合(图3)。区内披覆构造可划分两种类型:一种是断块潜山披覆构造组合,主要分布于英吉苏凹陷南、北斜坡,如群克构造、维马克构造、铁2井构造、新开屏西构造、新开屏东构造和塔东1井构造等;另一种是褶皱潜山披覆构造组合,主要分布于盆地中部,如阿拉干背斜、英南1井背斜等。

表 1 英吉苏构造带的构造特征
Table 1 Structural characteristics of the Yingjisu structural belt

序号	构造分带	圈闭名称	地震层位	地质层位	圈闭要素			主要控制测线	构造特征
					海拔零深度/m	幅度/m	面积/km ²		
I	北部斜坡带	孔雀河南地层圈闭	T8-3	J	-1 000	100	200	K87-769 K87-759	该带平面上呈三角形,北西向断裂发育,中、新生代地层受断层控制,逐级上抬,形成倾向盆地中心的掀斜断块。在库兹勒克以北 30 km,为侏罗系削蚀尖灭圈闭,古近系—新近系膏岩、泥岩为盖层
		群克 1 井构造	T8-3	J	-2 200	250	268	N5-651 EW-486	
II	新开屏背斜构造带	库兹勒克西构造	T8-3	J	-2 000	100	224	MD96-281	该带整体走向东西,呈向南弯突的弧形构造带。西段走向北西,局部构造分布于塔里木河断裂的上盘,构造长轴与断裂斜交;东段走向北东东,局部构造分布于罗布泊北缘断裂上盘,构造长轴与断裂平行。据地震资料分析,该带构造属断块潜山坡覆构造
		铁南 2 井构造	T8-3	J	-1 900	200	45	K88-781	
		维马克 1 井构造	T8-3	J	-2 000	200	48	MD96-956 MD87-794	
		新开屏西构造	T8-3	J	-1 800	100	28	K87-834	
		新开屏东构造	T8-3	J	-2 200	500	340	MD96-447	
III	英北向斜带							该带为一指向西部的三角形。该带侏罗系埋藏深,厚度大(1 600 m),为英吉苏凹陷主要生油区	
IV	阿拉干背斜构造带	铁 1 井南背斜	T8-3	J	-2 500	100	44	MD96-940 MD96-367	该带为一狭窄的弧形构造带,可分为北、南两个带:北带呈近东西向,由铁 1 井南背斜、英南 1 井背斜和英南 1 井东背斜组成,呈雁列式分布;南带分布于阿拉干以东,呈北东向分布,由 4 个呈雁列式分布的背斜组成。在地震剖面图上,背斜北翼缓,南翼陡,为断展褶皱,反映主压应力方向是由北向南的
		英南 1 井背斜	T8-3	J	-2 400	300	236	MD96-950 MD96-383	
		阿拉干背斜	T8-2	K	-2 000	150	310	MD96-415 MD96-431	
		阿拉干东背斜	T8-3	J	-2 200	<100	12	MD96-956	
V	英南向斜带							该带为一指向东的三角形,向斜呈一宽缓的碟形。侏罗系底部埋深相对英北向斜浅,侏罗纪地层最大厚度为 800 m,是英吉苏凹陷的主要生油区	
VI	古城墟斜坡带	阿南 1 井断鼻	T8-3	J	-2 400	<100	104	EW-450 MD96-399	该带南界为控制中生代地层分布的边界断层——罗布庄断层。带上分布有塔东 1 井构造,分布于罗布庄断裂下盘,长轴平行于断裂走向。阿南 1 井东构造位于阿拉干东断层的上升盘,长轴平行于该断裂走向,构造上有侏罗纪地层和古生代剥蚀面,可作为储层,白垩纪的膏岩和泥岩为盖层,形成很好的构造圈闭
		塔东 1 井构造	T8-2	K	-2 000	<50	80	MD96-351	
		阿南 1 井东构造	T8-2	K	-2 200	50	380	MD96-924	

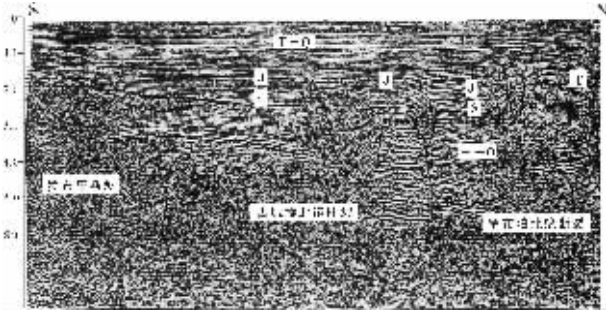


图2 地震反射剖面图(SN415, AA')

E-Q—古近系—第四系;K—白垩系;J—侏罗系;T—三叠系;
S—志留系;ε—O—寒武系—奥陶系

Fig.2 Seismic reflection profile across fold-thrust belts. See Fig.1 for the location of line AA'

E-Q—Paleogene-Quaternary;K—Cretaceous;J—Jurassic;
T—Triassic;S—Silurian;ε—O—Cambrian-Ordovician

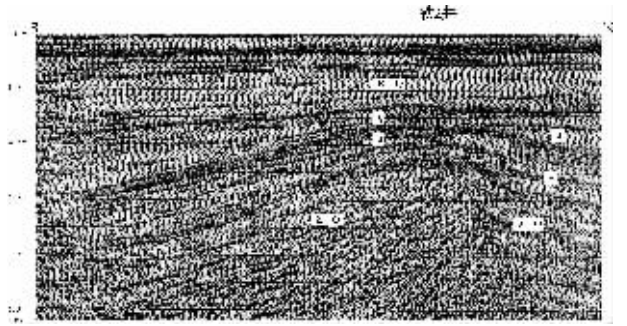


图3 披覆构造(K88-781,铁南2井构造)

K-Q—白垩系—第四系;J—侏罗系;S—志留系;
Z-O—震旦系—奥陶系

Fig.3 Drape anticline structure

K-Q—Cretaceous-Quaternary;J—Jurassic;S—Silurian;
Z-O—Sinian-Ordovician

英吉苏披覆盖层构造和基底参与的斜冲断层紧密相伴生,即无断不褶,形成于斜冲断层的终端,构成断展褶皱,显然这种褶皱具有与断层同步形成的特点^[5]。

2.4 盆地迁移

钻孔、地震和岩相分析资料表明,中生代以来,

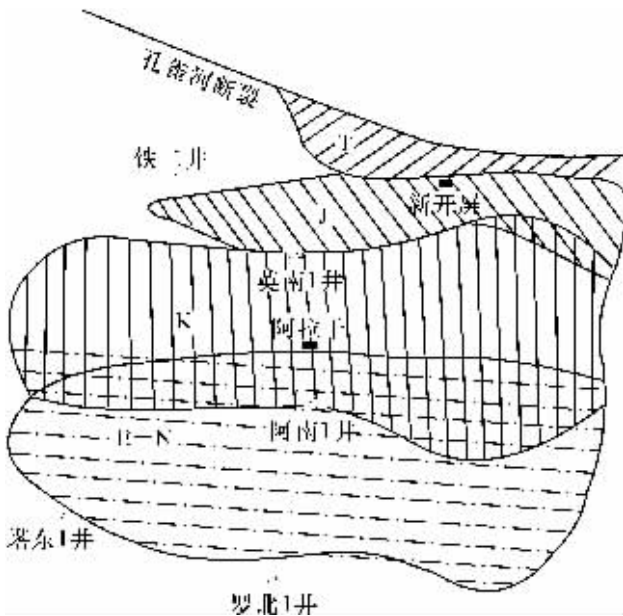


图4 英吉苏中生代沉积中心迁移示意图

T—三叠系;J—侏罗系;K—白垩系;E-N—古近系—新近系

Fig.4 Schematic map showing the migration of the Mesozoic-Cenozoic Yingjisu depocenter

T—Triassic;J—Jurassic;K—Cretaceous;
E-N—Paleogene-Neogene

各地质历史时期盆地的沉降中心是由北向南迁移^[6](图4)。三叠系分布于盆地北缘东部的山前地带,SN415地震剖面尤为明显,该剖面北端斜冲断层之下有一组呈散状下倾的地震波组,其厚度为1500~3000 m(图2)。侏罗系沉降中心已南迁于英北洼槽,地层最大厚度可达1600 m。白垩系沉积盆地扩大,沉降中心迁移到英南洼槽。由图5可以看出在侏罗系底界面埋深图的英北凹陷已消失,被斜坡所取代,阿拉干背斜带的北带已变成北部斜坡隆起带,英南凹陷也明显向南扩展。古近纪—新近纪地层沉积范围进一步扩大,向南扩展到古城墟斜坡以南。阿南1井揭示该区古近系底部为泥质岩和粉砂岩互层,向北各钻孔资料显示该层岩性的粒度变粗,反映古近纪的沉积中心已扩展到阿南1井及其以南地区^[7],罗北1井揭示了古近系覆盖在前震旦纪结晶基底之上。

三叠纪—新近纪地层向前陆方向呈逐层上超,在北部斜坡K87-844和MD95-480地震反射剖面图上记录了侏罗纪、白垩纪沉积作用由北向南扩展,地层逐层上超,造成高位域斜交前积相(图6),也反映了盆地北部逐渐隆升,随着地层时代变新,沉积中心逐步南迁的历史。

3 运动学和动力学机制

通过以上分析,英吉苏凹陷斜冲断层控制的构造分带、古隆起控制的中生代构造、地层受南北应

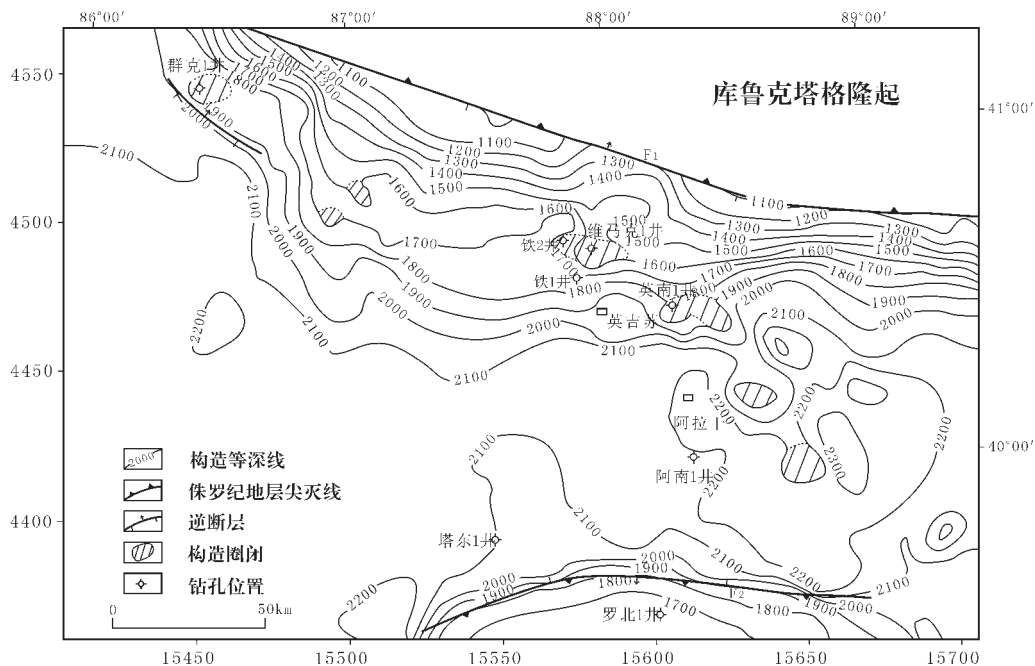


图 5 白垩纪底界面埋深图(等值线单位:m)

Fig.5 Contour map of the bottom of the Cretaceous of the Yingjisu depression

力作用叠置缩短及盆地的迁移等,都与基底卷入型褶皱—冲断层的形成和深层次的滑脱作用有关。据地震和大地电磁测深资料,在塔里木盆地北缘、库鲁克塔格以及天山造山带 20~30 km 深处存在厚约 10 km 的壳内低速层,18~30 km 深处存在壳内高导层^[2]。中国西部震源深度大多位于 10~30 km,

在强震区和多震区震源深度往往与下伏壳内高导层的发育相伴随^[8],也证实了这一滑脱层的存在。有资料表明,塔里木盆地在盖层与基底之间、上地壳与下地壳之间、壳—幔之间以及上地幔内部,存在着不同的密度界面,也表明深部地质结构存在多层的滑脱系统^[2]。区域资料研究结果表明,海西晚期天山大洋闭合,形成天山造山带,并向盆地内逆冲推覆^[9],致使岩石圈加载下弯,造成密度大、重而冷的克拉通基底

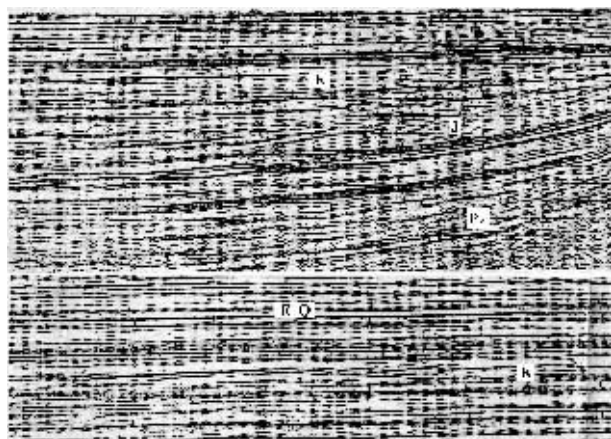


图 6 地震反射剖面图

E-Q—古近系—第四系;K—白垩系;J—侏罗系;Pz—古生界

Fig.6 Seismic reflection profiles (see Fig. 1 for the location of lines DD' and EE')

E-Q—Paleogene—Quaternary;K—Cretaceous;J—Jurassic;Pz—Paleozoic

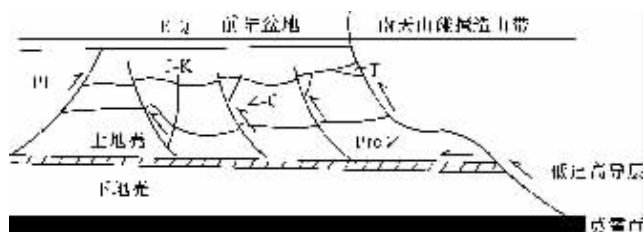


图 7 英吉苏背驮式前陆盆地地球动力学模型

E-Q—古近系—第四系;J-K—侏罗系—白垩系;T—三叠系;Z-C—震旦—石炭系;PreZ—前震旦系;Pt—元古界

Fig.7 Geodynamic model of the Yingjisu piggyback foreland basin

E-Q—Paleogene—Quaternary;J-K—Jurassic—Cretaceous;T—Triassic;Z-C—Simian—Carboniferous;PreZ—Pre-Simicen;Pt—Proterozoic

下沉到密度小、轻而热的造山带之下,形成前陆“A”型俯冲作用^[10](图7),其前陆的沉积作用和变形作用必然受到下伏斜冲断层构造的控制。鉴于上述分析,英吉苏中生代凹陷盆地的性质应属于背驮式前陆盆地。

有关英吉苏凹陷中生界变形的动力来源应考虑其周边板块构造热事件对其影响,这一时期天山没有板块俯冲发生,而塔里木南缘特提斯洋的周期性俯冲消减和闭合作用的远程效应则是天山和盆地内中生代构造变形的主因。如三叠纪晚期的羌塘碰撞、侏罗纪晚期拉萨碰撞、白垩纪晚期的科希斯坦碰撞及始新世在雅鲁藏布江缝合线发生的印藏陆陆碰撞^[11]。

4 结 论

(1)英吉苏凹陷中生代构造由北向南呈向南突出的弧形,并成排分布,局部构造集中分布在3个构造带内,背斜构造北翼缓,南翼陡,反映主压应力的作用方向由北向南。(2)断裂构造多向北或北东倾斜,平面上呈雁列分布,剖面上呈“丫”字形,反映断层作用扭应力的存在,叠瓦式构造、对冲构造反映断层作用挤压应力的存在,因此,压扭性断层是该区断层主要力学性质。(3)中生代褶皱之下都有古隆起为背景,而两者又多受上陡下缓向北倾斜的犁形断层的控制。(4)自中生代以来,随着地层时代的变新,沉积盆地中心由北向南迁移,反映了造山带向盆地逆冲推覆的历史,凹陷盆地的性质属于背驮式前陆盆地。

本文的地震资料来源于西北石油局和华北石油局,在此表示感谢。

参考文献(References):

- [1] 卢华夏,贾东,陈楚铭,等.库车新生代构造性质和变形时间[J].地学前缘,1999,6(4):215~221.
Lu Huafu, Jia Dong, Chen Chuming, et al. Nature and timing of the Kuqu Cenozoic structures [J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6(4): 215~221(in Chinese with English abstract).
- [2] 汤良杰.塔里木盆地演化和构造样式[M].北京:地质出版社,1996.69~80.
Tang liangjie. Evolution and structural styles of Tarim basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996.69~80(in Chinese with English abstract).
- [3] 李德伦,单玄龙,梁桂香,等.塔里木盆地孔雀河斜坡地区中生代地

质特征及油气远景评价[J].长春科技大学学报,1999,(4):334~340.
Li Delun, Shan Xuanlong, Liang Guixiang, et al. Geological characteristics of the Meso-Cenozoic and appraisal of oil and gas prospect of Kongquehe slop area in Tarim basin [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 1999, 29 (4): 334~340(in Chinese with English abstract).

- [4] 刘志宏,卢华夏,李西建,等.库车再生前陆盆地的构造演化[J].地质科学,2000,35(4):482~492.
Liu Zhihong, Lu Huafu, Li Xijian, et al. Tectonic evolution of Kuqa rejuvenated foreland [J]. Scientia Geologica Sinica, 2000, 35 (4): 482~492 (in Chinese with English abstract).
- [5] Show J H, Suppe j. Active faulting and growth folding in the eastern Santa Barbara Channel [J]. California Geological society of American Bulletin, 1994, 106: 607~626.
- [6] Beaumont C. Foreland basin [J]. J R Astr Soc, 1981, 65: 291~329.
- [7] 陈荣林,朱宏发,陈跃,等.塔里木盆地中生界沉积特征与石油地质[M].南京:河海大学出版社,1995.40~49.
Chen Ronglin, Zhu Hongfa, Chen Yue, et al. The characteristics of the Meso-Cenozoic sedimentation and petroleum geology in the Tarim basin [M]. Nanjing: Hehai University Press, 1995. 46~61 (in Chinese with English abstract).
- [8] 马宗晋.地震活动[A].见:马杏垣主编.中国岩石圈动力学纲要[C].北京:地质出版社,1987.25~29.
Ma Zhongjin. Seismic action [A]. In: Ma Xingyuan ed. Sketch of lithosphere dynamics in China [C]. Beijing: Geological Publishing House, 1987. 25~29 (in Chinese with English abstract).
- [9] 贾承造,姚慧君,魏国齐,等.盆地构造演化与区域构造地质[M].北京:石油工业出版社,1995.46~61.
Jia Chengzao, Yao Huijun, Wei Guoqi, et al. Tectonic evolution and regional structural geology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995. 46~61 (in chinese with English abstract).
- [10] 罗金海,车自成,李继亮.中亚及中国西部侏罗纪沉积盆地的构造特征[J].地质科学,2000,35(4):404~414.
Luo Jinhai, Che Zicheng, Li Jiliang. Structural features of Jurassic subsidence basin in the mid-Asia and western China [J]. Scientia geologica Sinica, 2000, 35(4): 404~414 (in Chinese with English abstract).
- [11] 陈发景,汪新文,张光亚,等.中国中生代前陆盆地的构造特征和地球动力学[J].地球科学,1996,21(4):366~371.
Chen Fajing, Wang Xinwen, Zhang Guangya, et al. Structural features and geodynamic of the Meso-Cenozoic foreland basin in China [J]. Earth Sciences, 1996, 21(4): 366~371 (in Chinese with English abstract).

Structural characteristics and genetic mechanism of the Meso–Cenozoic Yingjisu piggyback foreland basin

LI De-lun, DUAN Ji-ye, LIANG Gui-xiang, SHAN Xuan-long, CHENG Xin-min

(*School of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, Jilin, China*)

Abstract: The Meso–Cenozoic Yingjisu depression is a piggyback foreland basin developed in the setting of the Paleozoic thrust nappe structure. The sedimentation and deformation of the basin is strictly controlled by thrusts. From north to south the Meso–Cenozoic structure may be divided into seven belts: the northern slope belt, Qongkol–Xinkaiping anticlinal belt, northern Yingjisu synclinal belt, Alagan anticlinal belt, southern Yingjisu synclinal belt, Guchengxu slope belt and Luobuzhuang fault rise. The imbricate thrusts, upthrust structure, structural triangle zones, fault–propagating folds and drape structure are the main deformation styles of the Yingjisu depression. Since the Triassic, the depocenters in different epochs migrated from the orogenic belt to the foreland. The Meso–Cenozoic deformation dynamics and kinematics are related to the amalgamation of plates on the active continental margin of the southern Tarim plate margin and intracrustal detachment–shortening.

Key words: thrust; drape structure; piggyback foreland basin; Yingjisu depression