

23-28

# 逆冲推覆构造最新研究进展评述

张开均 施央申 黄钟瑾 王良书

(南京大学地球科学系·南京·210093)

p542.3  
p613

A

逆冲推覆构造最新研究进展包括以下 4 个方面:1. 创立新型逆冲推覆构造几何体系,其主要构造要素为台阶式逆冲断层,强调断裂与褶皱的相互关联性,可划分为断裂与褶皱两个分支系统。2. 发展平衡构造剖面的研究方法,用于计算造山缩短量并检验构造解释。3. 发现韧性推覆产生糜棱岩、混合岩、花岗岩三位一体的成岩作用和对金矿床的控制作用;浅表推覆构造对油气藏的控制作用;浅表台阶式逆冲断层对金属矿藏的控制作用,这种控矿作用常具有系统性和层控性特点。4. 建立褶皱冲断带增生楔力学模式,用以预测地壳变形的几何形态,并解释造山带陆壳的增生和生长。

关键词 逆冲推覆构造 构造分类 平衡剖面 岩石成因 控矿构造 运动学

逆冲推覆构造是当今地学最具活力的前沿课题之一。首先,它是碰撞造山带的基本构造类型,是认识岩石圈板块构造演化及其地球动力学的窗口<sup>[1~3,19]</sup>;其次,它作为一种重要的控矿构造,是寻找金属、非金属和能源矿产取得突破的关键,因而具有极为重要的经济意义。80 年代以来,在其运动学、几何学、动力学及其成岩控矿方面均取得了许多世人瞩目的进展,先后创立了以台阶式为特征、断层—褶皱相关的新型构造几何系统<sup>[9,14~16,22,21]</sup>,发展了充满理性思维、用于计算造山缩短量并检验构造解释的平衡构造剖面方法<sup>[11,13,20,21]</sup>,建立了褶皱冲断带形成动力学的“推土机”动态模式<sup>[10]</sup>,提出了韧性推覆剪切增温导致糜棱岩、混合岩和花岗岩三位一体的崭新概念<sup>[4,5]</sup>。

## 1 新的构造分类体系

目前逆冲推覆构造可划分为两个系统,即褶皱系统(图 1)和断层系统(图 2)。褶皱系统依台阶式逆冲断层的发育程度分成滑脱褶

皱(detachment fold)和断层转折褶皱(fault-bend fold)。前者仅发育底板断裂(断坪),向后依次多了个断坡,最后则发育了完整的台阶式断层系统。断层传播褶皱的形成晚于断坡,而断层转折褶皱则与断坡和断坪近乎同时。这种褶皱系统把纵弯与横弯两种褶皱作用完美地结合在一起。根据顶板断层发育与否,将断裂系统分成叠瓦状逆冲构造和双重逆冲构造(duplex structure)两大类,再根据逆冲断层传递方向和运动幅度进行详细分类(见图 2)。需要强调的是,双重构造具有特征的内部结构,一个夹块内的岩层由一对膝折型背斜和向斜组成,单个逆冲断层面既有上盘断坡,又有下盘断坡和中断坪。

新的构造分类体系有两大特色:一是其主要构造要素为台阶式逆冲断层,它是由 J. Rich(1934)在阿巴拉契推覆构造研究中提出的。现代高精度反射地震剖面和钻探实践证实,它是上地壳沉积岩层的一种基本构造类型。由于这种构造型式把沉积岩层成层性好所决定的断层传播方向性强、沉积岩

本文 1994 年 12 月收到,林镇泰编辑。

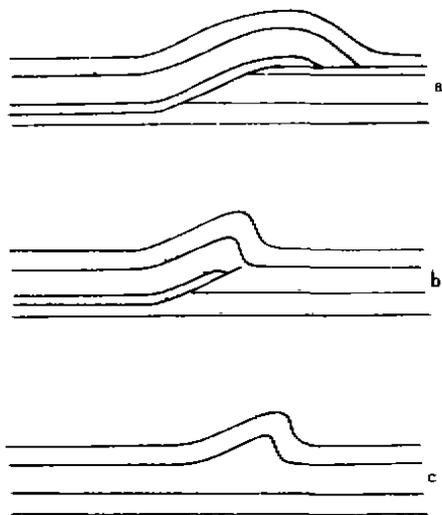


图1 推覆构造的褶皱系统

a—断层转折褶皱；b—断层传播褶皱；c—滑脱褶皱  
层垂向上岩性变化大带来的断层发育层位的选择性强，以及空间上断层与褶皱不可分离这一客观几何规律，三者有机地结合起来，这是一种成功的模式<sup>[14~16,20]</sup>。二是强调断裂与褶皱的相互关联性。事实上，在上地壳脆—韧性变形条件下，断裂的产生必须依赖岩层的挠动弯曲即褶皱来调节，而褶皱的形成必然导致岩层之不协调和错动位移，是为断裂。因此，两者属于一种因果联动关系。

## 2 平衡剖面的研究方法

平衡剖面(balanced cross-section)是指可以把变形构造通过几何原则全部复原的剖面<sup>[10,13]</sup>。事实上，原始沉积岩层的几何形态是简单的，而岩层变形总是遵循一定的几何规律；变形后的构造应能按此规律恢复其原始状态即平衡态。这种朴素的思想和研究方法贯穿着辩证法，并提高了构造研究的理性，使构造研究从定性发展到定量成为可能。它不仅能够检验构造解释合理与否；能恢复平衡的剖面是正确的(合理的)，不能恢复的则有问题存在；同时它还能帮助我们合理地推测地下未知构造；并且可以通过变形剖面与恢复剖面的对比，计算出造山缩短或伸长量，

真正了解构造演变过程。

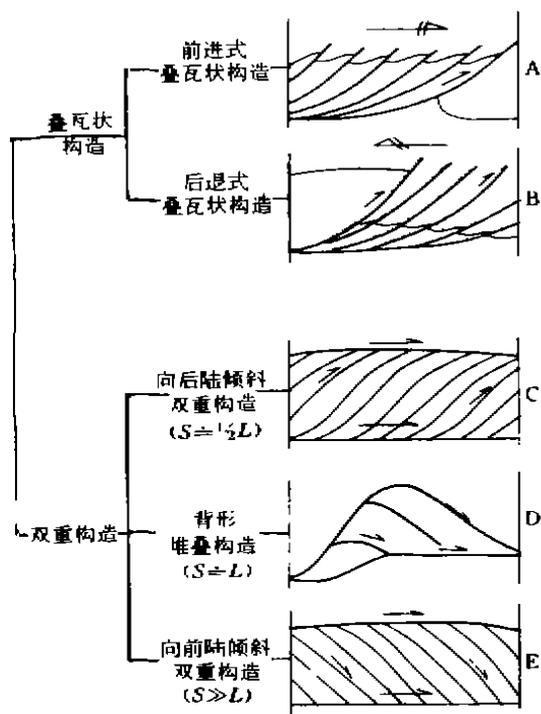


图2 推覆构造的褶皱系统

(据 Boyer S E and Elliot D, 1982).

S—夹块滑距；L—夹块长度

目前，编制平衡剖面主要采取面积平衡法和长度平衡法。综合运用这两种方法，可能会解决更多的问题。如最近，作者在安徽巢湖大型平卧褶皱研究过程中，发现早期褶皱两种平衡运算结果差别很大，面积平衡法较之长度平衡法结果要大得多(表1)。在排除了褶皱转折端加厚的可能性之后，发现其原因可能是褶皱根部产生虚脱而加大了褶皱实体的截面积<sup>[6]</sup>。

目前，平衡剖面的计算和模拟制作发展很快，通常分正演和反演两种方法(陈伟，1992)。

## 3 成岩成矿控制作用

### 3.1 韧性推覆剪切产生糜棱岩、混合岩和花岗岩的三位一体

表 1 巢湖平卧褶皱平衡运算

		长度平衡法	面积平衡法
原	理		
公	式	$\Delta t = t_0 - t$	$S_{ABCD} = S_{A'B'C'D'}$ $t_0 = S_{ABCD} / l_0$ $\Delta t = t_0 - t$
晚	测	$t_{02} = 26.06\text{km}$ $t_2 = 25.30\text{km}$	$S_2 = 63.14\text{km}^2$ $t_{02} = 7.25\text{km}$ $t_2 = 8.03\text{km}$
	运	$\Delta t = 0.76\text{km}$	$t_0 = 8.71\text{km}$ $\Delta t_2 = 0.68\text{km}$
早	测	$t_{01} = 36.21\text{km}$ $t_1 = 17.80\text{km}$	$S_1 = 118.58\text{km}^2$ $t_{01} = 3.10\text{km}$ $t_1 = 17.80\text{km}$
	运	$\Delta t_1 = 18.41\text{km}$	$t_0 = 38.25\text{km}$ $\Delta t_1 = 20.45\text{km}$

在华南花岗岩的最新研究中,发现糜棱岩、混合岩和花岗岩常常具有至为密切的四维联系。它们是韧性推覆剪切的产物。最近,张伯友(1992)<sup>[4]</sup>给出了粤桂区域性的研究论断,汪屹华等(1993)<sup>[5]</sup>在闽西南围埔,Zhang K J *et al*(1994)<sup>[22]</sup>在安徽洪镇则给出了典型的实例。

从理论上讲,韧性推覆剪切完全有可能形成糜棱岩、混合岩和花岗岩的三位一体<sup>[4,5]</sup>。假定推覆板片从深度  $H$  推覆到半无界空间,初始温度呈锯齿状分布,则地壳中温度 ( $T$ ) 随时间 ( $t$ ) 的分布满足下列热传导方程:

$$\begin{cases} \rho c (\partial T / \partial t) - D \partial^2 T / \partial z^2 = Q_f t A \\ T|_{z=0} = 0 \\ T|_{z=H} = \begin{cases} d/H \cdot G_b (0 \leq d \leq H) \\ (d/H - 1) \cdot G_b (d > H) \end{cases} \end{cases}$$

式中  $\rho$  为岩石密度; $c$  为岩石比热; $A$  为放射性生热率; $H$  为推覆板片的厚度; $d$  为深

度; $D$  为散热率; $G_b$  为推覆前的地温梯度; $Q_f$  为摩擦剪切生热率。

令推覆运动的总时间为  $t$ ,  $Q_f$  可表示为:

$$Q_f = \begin{cases} \delta(d-H) \cdot \tau \cdot v (0 \leq t \leq t_1) \\ 0 (t > t_1) \end{cases}$$

式中  $\delta(d-H)$  是 Dirac delta 函数; $\tau$  为剪切应力; $v$  为推覆运动速度,取推覆深度  $H = 15\text{km}$  (Sibson, 1977; White *et al*, 1980), 剪切带摩擦系数典型取值 0.4 (Brewer, 1981), 初始地温梯度取  $20^\circ\text{C}/\text{km}$ ,  $v$  取  $2\text{cm}/\text{a}$ ,  $A$  取上部地壳的平均生热率  $1.5 \mu\text{W}/\text{m}^3$ , 可得图 3 的结果。

当推覆板片运动了 2Ma 的时间,推覆面的温度可超过  $340^\circ\text{C}$ , 开始进入韧性变形域。当到了 5Ma 的时间,断面温度超过  $450^\circ\text{C}$ , 到 10Ma 的时间超过  $600^\circ\text{C}$ 。如果在中等地壳压力下,将  $450^\circ\text{C}$  以下作为糜棱岩的形成温度,  $450 \sim 600^\circ\text{C}$  作为混合岩形成温度,  $600^\circ\text{C}$  作为花岗岩形成温度 (Winkler, 1974), 随着推覆作用的进行,沿推覆面就会形成糜棱岩、片麻岩和混合岩,继而发生岩石重熔形成花岗岩。熔融一旦发生,逆冲断面上摩擦系数就会随之降低并导致生热率降低。因此,摩擦生热是一个自调节过程,熔融被限制在断面展布的范围。而岩石的熔点及混合岩化和糜棱岩化的临界温度是随着深度的增大而增高的,因此,如果将  $t = 10\text{Ma}$  的温度分布看作最大的温度剖面,当断面上的岩石达到最高温度而发生熔融时,其上、下两侧  $2 \sim 3\text{km}$  范围则处于混合岩化和糜棱岩化的温度区间,从而造成糜棱岩—混合岩—花岗岩的过渡分布 (图 4)。

由韧性推覆剪切所产生的糜棱岩、混合岩和花岗岩组合,在岩石学上常表现为变形的连续性,三者之间界线模糊;在矿物学上常表现为矿物变形的递进,糜棱岩中石英普遍变形,而在混合岩和花岗岩中则可能出现长石的韧性变形,并可能出现夕线石等特征矿物;在地球化学上,三者之间常表现为继承

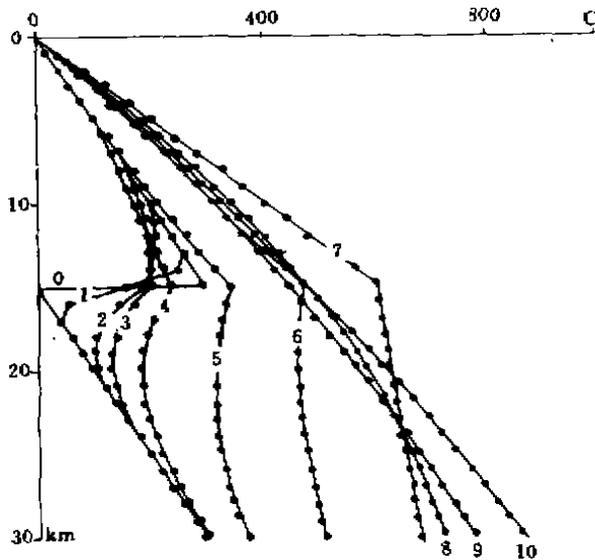


图3 由剪切摩擦热、放射性生热和平衡综合作用引起的瞬时地壳温度剖面。初始温度呈锯齿状 (据汪屹华, 1993)

$H = 15\text{km}, t_1 = 10\text{Ma}, v = 20\text{cm/a}, 0-t = 0\text{Ma}, 1-t = 0.01\text{Ma}, 2-t = 0.1\text{Ma}, 3-t = 0.2\text{Ma}, 4-t = 0.5\text{Ma}, 5-t = 2.0\text{Ma}, 6-t = 5.0\text{Ma}, 7-t = 10\text{Ma}, 8-t = 12\text{Ma}, 9-t = 20\text{Ma}, 10-t = 30\text{Ma}$

性,特别是稀土元素配分。总体来说,由韧性推覆剪切所产生的花岗岩属改造型花岗岩。然而,对改造型花岗的某些差别特征,必须加以改进。如在安徽洪镇, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  初始值小于 0.710,  $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$ , 这种变化主要是由于源岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  偏低,其中含中基性火成岩,  $\text{Na}_2\text{O}$  含量偏高。因此,岩石地球化学性质的决定因素是源岩(胡受奚等, 1987)。

### 3.2 逆冲推覆构造成矿控矿作用

#### 3.2.1 韧性推覆剪切对金矿床的控制

韧性推覆剪切常常形成低品位的大型金矿床。在韧性剪切过程中,石英的位错蠕变产生的缺陷,使金在高应变下从分散状态趋向于此集中,从而形成散布在石英中的自然金;另一方面,韧性变形又是一种退变质作用过程,伴随着矿物的分解和大量  $\text{SiO}_2$  析出,  $\text{SiO}_2$  可呈胶体吸附金离子和金络合离子,在剪过程中定位,于糜棱岩面理及 R、P 面中形

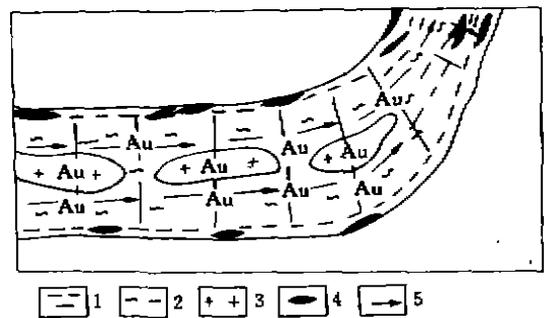
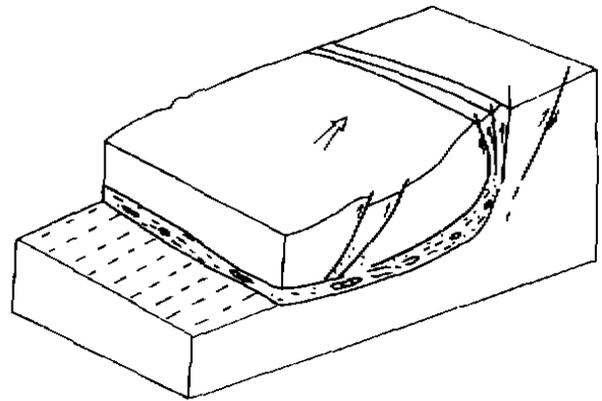


图4 韧性推覆剪切形成糜棱岩、混合岩、花岗岩模式图

(据张伯友, 1992)

1—糜棱岩; 2—混合岩; 3—花岗岩; 4—金矿体; 5—含金流体迁移方向

成具糜棱岩结构的石英脉型金矿床<sup>[4]</sup>。因此,韧性推覆剪切带既是含金流体的运移通道,也是金矿床的贮集空间。

#### 3.2.2 逆冲推覆对油气的控制

70年代末,国际上兴起逆冲推覆构造带的油气勘探理论。1975年,美国在落基山逆断层带发现了 Pineau 油田,并接连发现几个相同类型的油气田,引起世界石油地质界的极大关注。我国运用这种理论,在川东气田的勘探和塔里木盆地的找油实践中都有所突破。逆冲推覆断层对油气的成藏有着优势的方面,如改变油质,增加孔隙率并促使其富集,形成有利的圈闭构造,并提供运移通道。前断褶皱冲断带的埋藏型前锋如 POP—UP

构造、断层转折褶皱、断层传播褶皱等都是极为有利的成藏构造<sup>[16,17,20]</sup>。

### 3.2.3 台阶式逆冲断层对金属矿产的控制

作者在皖南地区构造研究中发现,台阶式逆冲断层也是皖南沿江多金属成矿带的一种重要的或主导的控矿构造<sup>[7]</sup>。其控矿的一个特点是其系统性。它往往兼导矿、布矿、贮矿构造于一体。断坡构造由于次一级的切层剪切,常广泛发育劈理、节理或裂隙构造,是最佳储矿场所;断坪构造由于其顺层性,受阻较小,其导矿、布矿性能优于断坡构造。中断坪恰处于背斜轴部,可能产生虚脱,是大型矿床重要的储矿部位。图5为控制金矿化的上盘断坡构造,断坡处的金品位和规模均大于断坪。台阶式逆冲断层控矿的另一个特点是层控性。前后断坪构造这一实质上的层间滑动构造,是台阶式断层的重要组成部分,沿着较软弱的岩性(如泥页岩等)发生、发展,单纯的层间断层是不存在的。

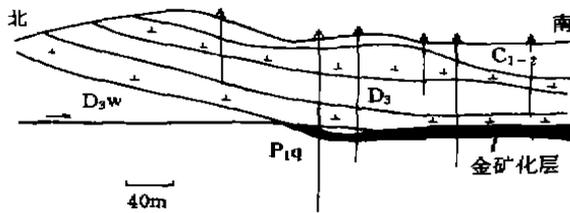


图5 安徽贵池四台控矿断坡构造

皖南沿江有如下几个比较重要的滑脱层位:下石炭统粉砂岩、下二叠统孤峰组硅质岩和中上三叠统黄马青组页岩,而与这几个层位紧邻的上覆层位都是区域上层控矿床的有利产出部位,如著名的新桥黄铁矿型铜矿、铜官山铜多金属矿产于中、下石炭统黄龙组和老虎洞组;黄马青组第一、二岩性段是白象山式铁矿床的主要赋矿层位(胡受奚等,1987)。显然,台阶式逆冲断层对这些层控矿床的形成,除了导矿、布矿作用外,发育该断层的软弱层位(主要位于断层之下),如泥页岩等,还起到防止成矿物质向下分散渗滤的作用。

## 4 褶皱冲断带增生楔力学模式

Chapple (1978)、Rodgers (1990, 1991)<sup>[19]</sup>强调褶皱冲断带主要表现为3个特点:(1)有一个滑脱或拆离的基底界面,界面之下不发生变形,而界面的倾向是朝造山带后陆;(2)基底滑脱面之上,岩层内受到大的水平挤压;(3)变形的岩层以楔形态为特征,其尖端(tapering)朝造山带前陆。这种楔形体可以看作是由其内部的逆冲断层所分割的岩块,由后陆往前段逐步堆积而成的。Chapple (1978)、Davis、Suppe *et al* (1983)、Dahlen、Suppe (1988)、Hatcher、Williams (1986)提出褶皱冲断带的这种变形机制,可以用开动着的推土机前面土质堆成的锥体的形变加以形象地解释。这些物质的内部形变持续发生,直到整个锥体具有临界坡度为止。任何物质加到增生楔状锥体都会引起进一步的内部形变,直到再一次达到具有临界坡度的几何锥体。

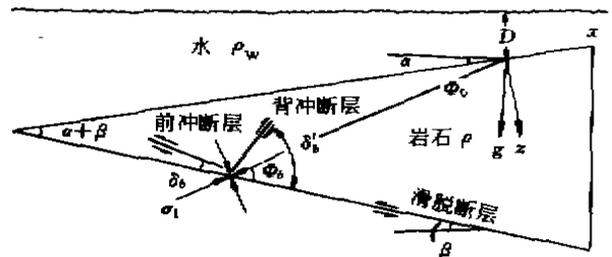


图6 笛卡尔坐标中临界锥体的横剖面示意图

(据 Dahlen & Suppe, 1998)

增生楔锥体临界尖锥形角(critical taper)  $(\alpha + \beta)$  是锥体基底摩擦及内部强度的函数,取  $\sin \alpha \approx \alpha$ , 则:

$$\alpha + \beta = \frac{\beta + (1 + \lambda_b) \mu_b}{1 + (1 - \lambda) k}$$

式中  $\alpha$  为楔的前方地形倾斜,  $\beta$  为基底的后方倾斜;  $\lambda$  和  $\lambda_b$  为 Hubbert 和 Rubey (1959) 的纯流体压力比率, 分别在楔的内部和底部;  $\mu_b$  为楔底的摩擦系数;  $k$  与最大挤压的角度有关并依赖于  $\mu_b$  和  $\mu$  的无量纲数。

$$k = \frac{\sin\Phi}{1 - \sin\Phi} + \frac{\sin^2\Phi_b + \cos\Phi_b(\sin^2\Phi - \sin^2\Phi_b)^{\frac{1}{2}}}{\cos^2\Phi_b - \cos\Phi_b(\sin^2\Phi - \sin^2\Phi_b)^{\frac{1}{2}}}$$

式中  $\Phi = \text{tg}^{-1}\mu$ ,  $\Phi_b = \text{tg}^{-1}\mu_b$

通过上述理想锥体的平衡状态及其动力学分析,如果我们把造山带前陆褶皱冲断带简单地当作一种内部物理性质基本均一的岩块锥体的话,就不难看到,一系列自造山带核部向前陆盆地逆冲推覆的逆冲断层,实际上相当于临界锥体内部发育的逆冲断层(图6)。这些逆冲断层的发生以及沿基底不连续而发生滑脱,与整个楔状岩块(锥体)的物理性质、楔状岩块的产出位态有关。在地壳水平挤压应力作用下,可根据物质的强度、流体压力和摩擦力预测地壳物质形变(主要指发生剪切破裂)的几何形态。增生楔理论原理可以较好地解释造山带陆壳的增生和生长。

#### 参考文献

- 1 郭令智等. 现代大地构造学展望. 南京大学学报(地球科学), 1990, 2: 1-7
- 2 许靖华等. 是华南造山带而不是华南地台. 中国科学(B辑), 1987, 10: 1107-1116
- 3 施央申等. 油气盆地研究新进展的几个问题. 南京大学学报(地球科学), 1993, 2: 133-140
- 4 张伯友等. 深层次推覆构造带岩石垂向分带的推覆-剪切增温模型及其研究意义. 南京大学学报(地球科学), 1992, 2: 155-166
- 5 汪屹华等. 福建里田花岗岩韧性推覆剪切成因. 岩石学报, 1994(增刊): 77-85
- 6 张开钧, 施央申. 安徽巢湖大型平卧褶皱研究. 大地构造与成矿学, 1993, 2: 179-190
- 7 张开钧, 李阳. 皖南台阶式逆冲断层控矿. 地质与勘探, 1994, 3: 14
- 8 Bachman G H *et al.* Exploration in a classic thrust belts and its foreland; Bavarian Alps, Germany. AAPG, 1982, 7: 2529-2542
- 9 Boyer S E, Ellitot D. Thrust systems. AAPG, 1982, 1: 1196-1230
- 10 Davis D *et al.* Mechanics of fold and accretionary wedges. *J. Geophysics Research*, 1983, 6: 1153-1172
- 11 Depaor D G. Balanced section in thrust belts. AAPG, 1988, 1: 15-28
- 12 Hollister L S, Crawford M L. Melt-enhanced deformation; a major tectonic process. *Geology*, 1986, 5: 558-561
- 13 Hossack J R. The use of balanced cross-section in the calculating of orogenic contraction; A review. *J. Geological Society of London*, 1979, 7: 705-711
- 14 Jamisor W R. Geometric analysis of fold development in overthrust terranes. *Tectonophysics*, 1991, 2-4: 205-252
- 15 Mitra S. Fault-propagatin folds, geometry, kinematics evolution and hydrocarbon traps. AAPG, 1990, 6: 921-945
- 16 Mitra S. Duplex structures and imbricate thrust systems: Geometry, structural position and hydracarbon potentian. AAPG, 1986, 7: 1087-1112
- 17 Morley C K. A classification of thrust fronts. AAPG, 1986, 1: 12-25
- 18 Ramsay J G, Huber M I. The techniques of modern structural geology. Academic Press, 1983
- 19 Rodgers J. Fold-and-thrust belts in sedimentary rocks, Part 1; typical examples. *American Journal of Science*, 1990, 3: 321-359
- 20 Suppe J. Geometry and kinematics of fault-bend folding. *American Journal of Science*, 1983, 6: 684-721
- 21 Woodward N B *et al.* Thrust fault geometry of the Snake Range, Idaho and Wyoming. *Geological Society of American Bulletin*, 1986, 2: 178-193
- 22 Zhang K J *et al.* The ductile shearing-thrusting genesis of Hongzhen granitoid, Anhui Province. *Chinese Journal of Geochemistry*, 1994, 3

### Review on Latest Advances in Thrust Structure Studies

Zhang Kaijun, Shi Yangshen, Huang Zhongjin, Wang Liangshu

Latest advances in thrust structure studies involve: 1. Initiate a new structural geometry, characterized by major element of stepped thrust and by related fold and fault. 2. Develop balanced cross-section to calculate structural shortening and to estimate explanation to structures. 3. Discover diagenesis to mylonite, magmaite and granite by ductile thrusting, and controlling to oil-gas and metallic ore by surficial thrusting. 4. Build accretionary wedge model for fold and thrust belt, to predict geometry of crustal deformation and to explain evolution of continental crust within orogen.

**Key words**, thrust structure, structural geometry, balanced cross-section, diagenesis, ore-controlling structure, kinematics