

# 构造三角带的概念及其油气勘探意义

王瑞瑞<sup>1</sup>, 张岳桥<sup>2</sup>, 董树文<sup>3</sup>, 徐先兵<sup>1</sup>, 许怀智<sup>1</sup>

WANG Rui-rui<sup>1</sup>, ZHANG Yue-qiao<sup>2</sup>, DONG Shu-wen<sup>3</sup>, XU Xian-bing<sup>1</sup>, XU Huai-zhi<sup>1</sup>

1. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210093;

2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 3. 中国地质科学院, 北京 100037

1. *School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China;*

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

3. *Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*

**摘要:**构造三角带通常发育于褶皱冲断带中,是油气勘探的重要目标。构造三角带具有多种几何形态和命名,其中,阿尔伯达型构造三角带具有普遍意义。近年来,国内外对构造三角带的研究工作取得了重要进展。利用物理模拟和数值模拟并结合实际地质情况,许多学者对构造三角带的演化提出了多种运动学模型和成因解释,本文介绍了2个运动学模型和单斜推进模式。影响构造三角带形成与发展的因素包括滑脱层、地层能干性差异、同构造沉积、剥蚀等。由于其内部构造的复杂性,三角带的地震剖面品质一般较差。而利用地震模拟和生长地层的方法可以在地震剖面上帮助识别出构造三角带。国内的地震勘探表明,中国西部挤压盆地中广泛发育三角带构造。文中列举了中国西部盆地中发育的构造三角带的实例。

**关键词:**构造三角带;双重构造;褶皱冲断带;油气勘探

中图分类号:P54;P618.13

文献标志码:A

文章编号:1671-2552(2010)02/03-0317-13

**Wang R R, Zhang Y Q, Dong S W, Xu X B, Xu H Z. The definition of triangle zone and its petroleum prospecting significance. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(2/3):317-329**

**Abstract:** Triangle zones normally develop in foreland fold-and-thrust belts and become favorable object of petroleum exploration. The geometry and nomenclature of triangle zones vary from place to place, among which Alberta-style triangle zone is of common significance. Progresses have been made on triangle zones in that a large number of work have been done at home and abroad in recent years. Based on physical and numerical modeling and integration of geological data, different kinematic and genetic models have been proposed, in which two kinematic models and a genetic model, prograding monocline model, are presented in this paper. Factors influencing the formation and development of triangle zones include décollement, variation of mechanical stratigraphy, syntectonic sedimentation, erosion and so on. Owing to their complexity in structure, triangle zones commonly have poor quality on seismic profiles. Consequently, seismic modeling and strata-in-growth method can be used to identify triangle zones. Seismic explorations demonstrate that triangle zones are widely distributed in zones around the basins in western China, and several examples are shown in this paper.

**Key words:** triangle zones; duplex structure; fold-thrust belts; petroleum exploration

构造三角带通常发育于前陆褶皱冲断带中,是油气勘探的重要目标,同时也记录了造山带形成演化的重要信息,因此国内外学者高度重视对构造三角带的研究<sup>①</sup>。近年来的地震勘探成果显示,中国西部的挤压

型盆地周缘普遍发育三角带构造,其中蕴藏着丰富的油气资源,是油气勘探的新领域。本文就近年来国内外对三角带构造的研究进展进行了综述,并总结了国内三角带构造的油气勘探实例。

收稿日期:2009-04-01;修订日期:2009-09-01

科技项目:国家科技专项(编号:SinoProb-8)资助

作者简介:王瑞瑞(1984-),男,在读硕士,从事盆地构造分析研究。E-mail: wangruiwrrr@yahoo.com

通讯作者:张岳桥(1963-),男,研究员,博士生导师,从事构造地质、区域构造和盆地分析研究。E-mail: zhangyueqiao@yahoo.com

## 1 “三角带”术语的起源

在构造地质学中,“三角带”(triangle zones)的概念诞生于前陆构造带地震勘探成果,最早出现于Shell石油公司的内部报告,由Gordy于1957年10月使用,至1977年首次在文献中使用<sup>[2]</sup>,用以描述加拿大科迪勒拉山前东缘的一个典型三角构造。

对三角带构造的几何形态描述的术语经历了一定的沿革<sup>[1-11]</sup>。Fallot<sup>[3]</sup>研究法国阿尔卑斯西南部 argentara 地块西南侧沉积盖层中的逆冲断裂带时,将外来的岩块命名为插入楔体(intercutaneous wedge),此后Charlesworth等<sup>[4]</sup>沿用了该术语。Roeder<sup>[5]</sup>将Alberta山前的构造命名为三角构造(delta structure),它实际上等同于后来Gordy等<sup>[2]</sup>提出的三角带(triangle zone)概念。McMechan<sup>[6]</sup>在研究落基山山前地区时,发现一种与三角带概念不完全相同的构造,称之为低锥顶角三角带(low-taper triangle zone),以底板逆冲与顶板逆冲之间较小的夹角为特征。Banks等<sup>[7]</sup>将巴基斯坦 Sulaiman 和 Kirthar 山前构造的几何形态命名为被动顶板双冲构造(passive-roof duplex)。Price<sup>[8]</sup>在研究科迪勒拉山时使用构造楔(tectonic wedge)一名,Lawton等<sup>[9]</sup>根据地震剖面描述了一种楔形的异地岩块插入原地岩层中,也称之为构造楔(tectonic wedge)。Groshong等<sup>[10]</sup>将地震剖面上解释的三角带称为蛇头构造(snakehead structure)。Shaw等<sup>[11]</sup>使用了构造楔(structure wedges)一词,并指出当构造楔达到山前构造规模时,将其称作三角带(triangle zones)。

在英文文献中,三角带的名称有多个,如delta、triangle、wedge、snakehead等,其实它们基本上属于同一种类型。由此,本文沿用Gordy等<sup>[2]</sup>的术语,将

这类构造统称为三角带构造或构造三角带。

## 2 构造三角带的几何类型

不同学者对于构造三角带的几何形态存在不同的理解。综合前人的研究结果,可以将构造三角带的几何形态总结为下列6类(图1)。

**I型三角带:**由Couzens等<sup>[12]</sup>提出(图1-a),由单滑脱层及其上分别倾向前陆和腹陆的反冲(back-thrust)、前冲(forthrust)组成<sup>[13]</sup>,底部的滑脱层一般为盐岩或其他蒸发岩<sup>[14]</sup>。这种三角带不仅发育在前陆构造带中,在陆内造山带中也广泛发育,如中、下扬子地区的对冲带<sup>[15]</sup>、闽西南武夷山地区的对冲构造<sup>[16]</sup>。

**II型三角带或阿尔伯达型三角带:**此类三角带在加拿大阿尔伯达地区最先发现,也最为典型,由Couzens等<sup>[12]</sup>和Zapata等<sup>[20]</sup>提出,是指被动顶板双重构造的前缘部分。这从阿尔伯达三角带的高质量地震剖面上看得很清楚,三角带是位于浅层地层单元之下并被动地被其下的逆冲楔抬升的双重逆冲<sup>[21]</sup>。它具有双滑脱层或多滑脱层,由盖板层序(cover sequence)、顶板滑脱层(roof detachment)、断夹块(horse)和底板滑脱层(floor detachment)组成,其中盖板层序发育倾向前陆的反冲构造(图1-b)。由于该类三角带中的双重叠瓦构造提供了油气生成所需的地温梯度,同时存在多个重复的储层和主要的油气圈闭边界,因此这类三角带受到油气勘探者的广泛重视。狭义的三角带就是指这类构造。一般来说,I型三角带主要发育在以褶皱为主的前陆构造带中,而II型三角带则主要发育在以冲断为主的前陆构造带中<sup>[12]</sup>。

文献中有的学者使用“被动顶板双重构造”

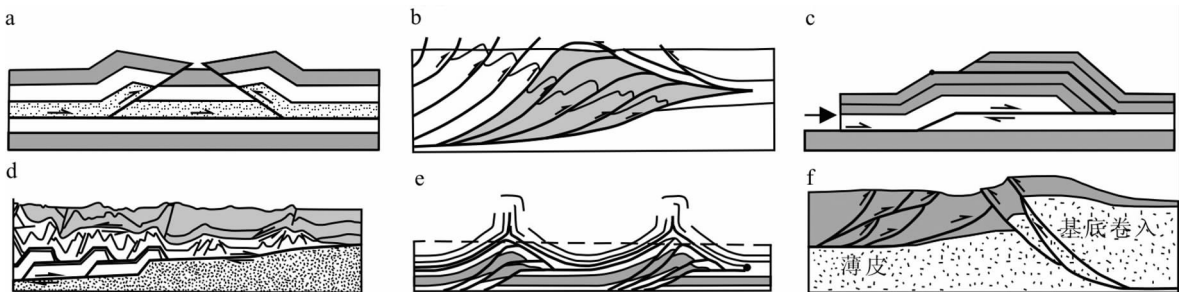


图1 构造三角带几何分类

Fig. 1 Classification of triangle zones

a— I型三角带<sup>[17]</sup>; b— II型或阿尔伯达型三角带<sup>[18]</sup>; c—构造楔<sup>[17]</sup>; d—低锥顶角三角带<sup>[6]</sup>; e—间距离断坡背斜<sup>[19]</sup>; f—厚皮三角带<sup>[20]</sup>

(passive-roof duplex)的概念,实际上它等同于阿尔伯达型三角带的概念<sup>[22]</sup>,因此部分学者主张用“被动顶板构造”这个术语来代替三角带<sup>[7,23]</sup>。如果盖板层序均为前冲,则称为“主动顶板双重构造”(active roof duplex),而不是三角带<sup>[12]</sup>。如果盖板层序既有前冲又有反冲时,Bonini<sup>[24]</sup>将之命名为“复合顶板双重构造”(composite-roof duplex)。这里需要区分被动顶板双重构造与双重构造(duplex),它们既有相似之处,也存在差异。被动顶板双重构造是特殊的双重构造。“双重构造”一词最早出现在 Dahlstrom<sup>[25]</sup>的文章中,由顶板逆冲断层、底板逆冲断层及其间的断夹块组成。Boyer 等<sup>[26]</sup>将双重构造的几何形态分为 3 种类型:倾向腹陆的双重构造(hinterland dipping duplex)(图 2-a)、背形堆叠式双重构造(antiformal stack duplex)(图 2-b)和倾向前陆的双重构造(foreland dipping duplex)(图 2-c)。除了背形堆叠式双重构造外,大多数双重构造都不是位于冲断带的前缘。双重构造与被动顶板双重构造的主要区别在于,双重构造的顶板逆冲和底板逆冲均为向前陆方向逆冲,而被动顶板双重构造则强调顶板逆冲是向腹陆的方向逆冲<sup>[27]</sup>。

除了上述 2 种类型的三角带外,还有另外 4 种类型——构造楔、低锥顶角三角带(low-taper triangle zone)、间距断坡背斜(spaced ramp anticlines)和

厚皮三角带。

构造楔(tectonic wedge 或 structure wedge)是异地岩体插入近原地的上覆岩层和原地的下伏岩层中所形成的,在形态上,其上下边界被 2 条相反方向的逆冲断层所围限<sup>[8]</sup>。图 1-c 中的构造楔仅仅是与三角带形态相似的一种,实际上构造楔较为复杂,具有多种类型。按几何形态,构造楔可分为 3 种类型:单楔、双楔、三楔(图 3-a);按形成规模可以划分为 2 类(图 3-b): I 型构造楔发育在造山带前缘,类似于阿尔伯达型三角带,具体实例有印度尼西亚苏门答腊地区<sup>[11]</sup>; II 型构造楔为汇聚造山时的地壳或岩石圈规模的,在欧洲阿尔卑斯山和比利牛斯山最为典型<sup>[8,29,30]</sup>。

低锥顶角三角带(low-taper triangle zone)以底板逆冲与顶板逆冲之间较小的夹角为特征(图 1-d)。三角带的边界反冲断层的剖面长度一般为 5~15km,但在低锥顶角三角带中反冲断层的剖面长度可达 30~70km。典型的实例为加拿大落基山北部的 Pine Pass-Peace River 地区<sup>[31]</sup>。

造山带前缘向前陆方向移动传播时,并非一直在原三角带处变形,而是会在前缘形成新的三角带。这样的组合就称为间距断坡背斜(spaced ramp anticlines,图 1-e),它是由底部滑脱层为强滑脱层或快速缩短时所形成的<sup>[19]</sup>。这种类型也较为常见,常说的



图 2 双重构造的分类<sup>[26]</sup>

Fig. 2 Classification of duplexes

a—倾向腹陆的双重构造;b—背形堆叠式双重构造;c—倾向前陆的双重构造

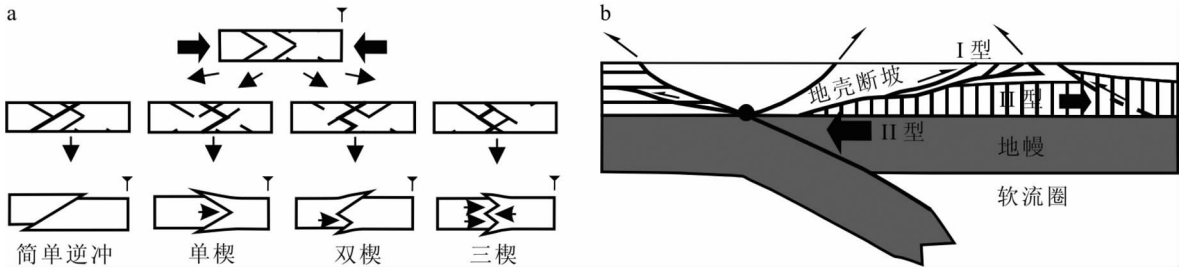


图 3 构造楔的几种类型

Fig. 3 Classification of structure wedges

a—按几何形态划分的 3 类构造楔<sup>[28]</sup>;b—按规模划分的 2 种类型的构造楔<sup>[29]</sup>



隔档式或隔槽式褶皱大多就属于这种类型,在欧洲侏罗山地区、阿根廷西北部 Subandean 冲断带和国内的川东地区较为发育<sup>[32-35]</sup>。

大多数发现的三角带都是薄皮构造,但是在阿根廷前科迪勒拉冲断带前缘,Zapata 等<sup>[20]</sup>发现了厚皮三角带(thick-skinned triangle zone)。它由向腹陆逆冲的卷入基底的反冲断层和向前陆的薄皮逆冲断层构成(图 1-f)。厚皮三角带不具有双重叠瓦构造,因此油气勘探的目标只能是由地层尖灭(stratigraphic pinch-outs)、反序逆冲(out-of-sequence thrusts)、突破背斜(breakthrough anticlines)等形成的圈闭。阿尔伯达型三角带的前冲和反冲同时形成,而厚皮三角带的前冲和反冲的形成时间相对独立,所以应该注意厚皮三角带的形成对油气运移和圈闭的影响<sup>[20]</sup>。

### 3 构造三角带的演化模式

因为阿尔伯达型三角带最为常见和典型,所以本文重点讨论这类三角带的运动学模型。Cooper<sup>[23]</sup>提出“假被动顶板双重构造”(pseudo-passive-roof duplexes)的概念,认为在以下几种情况下会出现三角带的假像:①基底卷入的逆冲断层作用;②早期正断层经后期反转;③同造山沉积;④岩层厚度变化。因此,研究三角带时不仅要研究其几何形态,更要注重其成因机制,防止被假像迷惑。

根据双重逆冲构造的实际统计数据,单侧挤压、软硬相间的岩层组合是发育双重逆冲构造的重要条件<sup>[26]</sup>。双重逆冲形成时,盖板层序通过被剥蚀掉或内部的变形来平衡缩短。在三角带构造中,逆冲席不是被直接逆冲到地表形成叠瓦式逆冲,而是向上被楔入非能干性地层或滑脱层中。上滑脱层下的断夹块将一直加厚并且向前陆移动,直到达到下滑脱层的临界点<sup>[36]</sup>。

三角带的演化可以分为 3 个阶段:起始(initiation)、稳定发展(stable growth)和破坏(abandonment)。三角带开始于反冲边界断层的形成。稳定发展阶段主要表现为山前冲断层和相关褶皱的形成。只要最初的反冲断层仍作为前陆褶皱冲断带的边界断层,三角带就一直处于稳定发展阶段。随着新的反冲断层的发展,原三角带被破坏,新三角带则形成<sup>[37]</sup>。由此可见,反冲断层是三角带演化中的关键要素,实际上它也是三角带与双重构造相区别的

方。前陆的支撑(buttrass)对于反冲位移很重要,它存在于三角带向前陆方向的上下层间,类似于平衡剖面中的钉线,可能是上滑脱层或能干性强的盖层尖灭所导致的<sup>[38]</sup>。

三角带的形成目前主要有 2 个运动学模型,即 Jones<sup>[21]</sup>的模型(图 4-a)和 Charlesworth 等<sup>[4]</sup>的模型(图 4-b)。这 2 个模型的下滑脱层都具有断坪断坡的几何形态,它们的差别在上滑脱层。Jones<sup>[21]</sup>认为初始未变形时两滑脱是相互平行的断坪。而 Charlesworth 等<sup>[4]</sup>认为 Jones 的模型从动力学上讲是不合理的(因为它需要平行于断层的相反的剪切),上下滑脱层开始时是以共轭断层发展的,并且上滑脱层发育的断坡与下滑脱层断坪所成的角度大于 30°。Price<sup>[8]</sup>也认为三角带是在安德森断层理论预测的两共轭逆冲断层发展的基础上形成的,但是他并没有讨论为什么在有些逆冲系统里产生共轭逆冲断层,而在其他系统里不产生共轭逆冲断层。

### 4 构造三角带的成因机制

近年来,许多学者对三角带的成因机制进行了研究,提出了定性的模型<sup>[12,18,22,39-40]</sup>和定量的模型<sup>[31,37]</sup>。

双重逆冲构造盖板层序的变形可分为 3 个端元:①当盖板层序与下伏的双重构造耦合时,则盖板层序向前陆逆冲,形成前冲;②当盖板层序与下伏的双重构造脱耦时,盖板层序相对于向前陆方向移动的双重构造向腹陆被动地变形,形成反冲;③当盖板层序与下伏的双重构造脱耦且变形仅局限于双重构造上方时,无明显的向前陆或腹陆搬运而变形,只局限集中于断夹块的上方<sup>[41]</sup>。因此,盖板层序、下伏双重构造和它们之间的顶板滑脱层的性质是三角带能否形成的关键。

Couzens-Schultz<sup>[39]</sup>研究发现,落基山山前中部的三角带的顶板滑脱层位于一个以页岩/泥岩为主的硅质碎屑的沉积序列。对泥岩的矿物学研究表明,在达到最大埋深时,粘土矿物部分发生了蒙脱石向伊利石的转换。蒙脱石-伊利石发生转换的界面即为反冲发育断裂的部位。在落基山地区,这个转换界面是与顶板滑脱层的顶部相关的。而在墨西哥湾,这个转换界面是与超压的、有利于滑脱的并且密度对应减小(孔隙度增大)的地方相对应的<sup>[39]</sup>。

Jones<sup>[22]</sup>提出了经验性的单斜推进模式(prograding monocline model)(图 5)。该模式定义了超压封

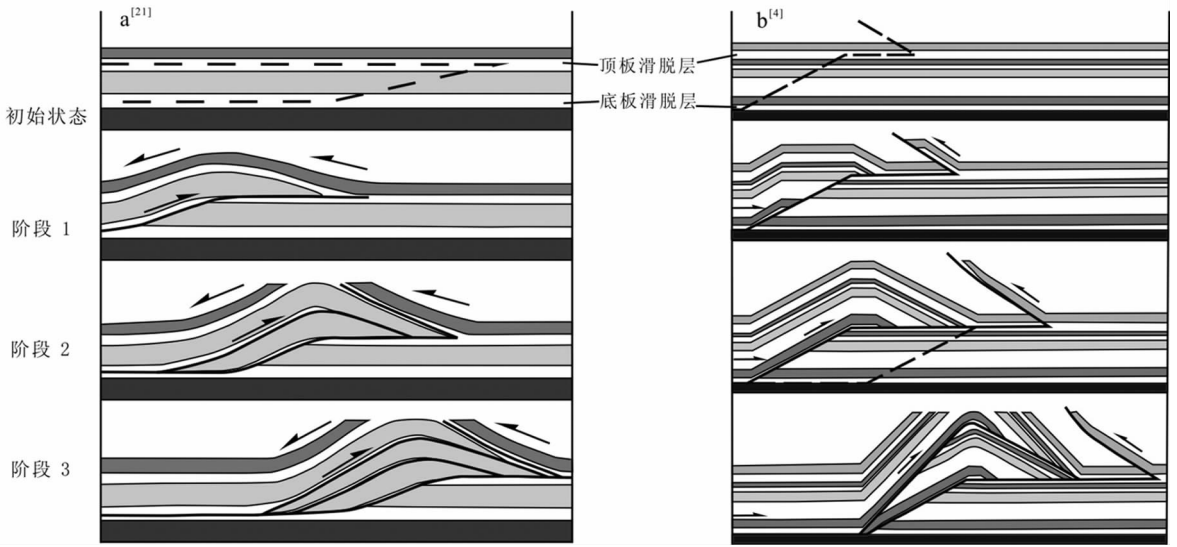


图 4 三角带演化的运动学模型

Fig. 4 Kinematic models of the development of triangle zones

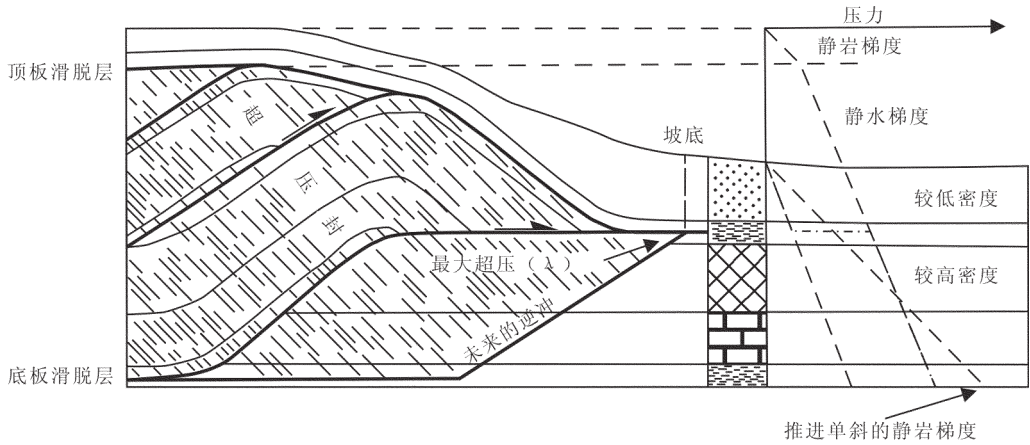


图 5 单斜推进模式<sup>[2]</sup>

Fig. 5 Prograding monocline model

(overpressured envelope)的概念,即位于上下滑脱层间的流体超压的部分,这部分岩石密度大,与盖层低密度序列接触。通过地表地形可以看出,超压封内的楔冲在变形带前缘形成倾向前陆的单斜。随着每个逆冲楔连续侵位引起地形隆起,超压封内的超压得以维持。当单斜层前缘静水压力接近或超过静岩压力时,逆冲和单斜进一步向前陆推进。依据单斜推进模式,当上滑脱层被剥蚀破坏从而暴露出下伏的冲断带和超压封时,反冲得以形成。因为超压的最终降低或全部消失将会阻止沿着上滑脱层的进一步差异运动,所以此时会形成反冲断层

来平衡最后阶段的缩短<sup>[22]</sup>。

### 5 构造三角带的发展与破坏

加拿大落基山脉发育的三角带构造被认为贯穿于褶皱冲断带发展的始终。随着向前陆的连续变形,当新的三角带在前陆方向出现时,老的三角带变得不活跃并被动地被搬运<sup>[42]</sup>。

Jamison<sup>[31]</sup>运用临界库仑楔理论(critical coulomb wedge theory)研究了反冲楔(backthrust wedge)(三角带中反冲断层上面的部分)的力学稳定性,认为大多数三角带的几何形态都是稳定的。在活动的

冲断带,三角带内冲断层增加的位移以3种方式进行调节:①递增位移向着已有的反冲断层方向传播(图6-a);②反冲断层不运动,形成新的反冲断层(图6-b);③反冲断层不运动,产生新的前冲断层(图6-c)<sup>[31]</sup>。

随着造山作用的继续,造山带前缘向着前陆方向移动,这样早期的被动顶板双重构造就会被后期的逆冲所叠加。如果仅仅受单个逆冲传播方向的叠加,而且受岩性改变或基底的影响,那么就会形成一系列的被动顶板双重构造,即间距断坡背斜(图7)。当造山作用继续发展时,随着地层被抬升,早期形成的三角带将被剥蚀和破坏掉<sup>[14,23]</sup>。

## 6 构造三角带的影响因素

影响构造三角带发育的主要因素包括滑脱层、地层能干性差异和地层厚度变化。

### 6.1 滑脱层

滑脱层一般为蒸发岩或页岩,它是三角带形成必不可少的部分,并对其形成演化产生影响。在三角带中,除了顶板滑脱层和底板滑脱层外经常会有多滑脱层<sup>[9,43]</sup>,多滑脱层一般会导致双重构造的形成<sup>[19]</sup>。

能干性较弱的盐岩常作为滑脱层,同时它还具有较小的密度。盐岩的出现会减弱上下层间的耦合程度,从而使褶皱冲断推覆楔的剖面锥角(cross-sectional taper)保持为 $1^\circ$ 或更小,而无盐岩时锥角为 $8\sim 12^\circ$ <sup>[44]</sup>。

滑脱层深度控制了构造的样式。当滑脱层较浅时,将发育规律的宽阔的褶皱;当滑脱层较深时,倾向于发育双重构造及多波长的褶皱<sup>[45]</sup>。滑脱层的强度、尖灭及挤压速率也会影响三角带的样式和发展<sup>[12,46-47]</sup>。较大强度的滑脱层或快速的缩短变形会形成间距背斜<sup>[19]</sup>。上下滑脱层的摩擦力是三角带演化中影响应变分布的主要因素<sup>[37]</sup>。滑脱层面的分层作用使构造楔得以插入原地的地层中<sup>[8]</sup>。

Krzywiec等<sup>[48]</sup>认为滑脱层向前陆尖灭的位置即为反冲发育的地方,但Couzens-Schultz等<sup>[19]</sup>认为滑脱层的尖灭会产生前冲。

### 6.2 地层能干性差异

一般而言,构造样式是由地层的力学性质和受力状况所控制的。国内外很多学者都强调地层能干性对构造变形的影响<sup>[49-53]</sup>。地层的力学性质包括地

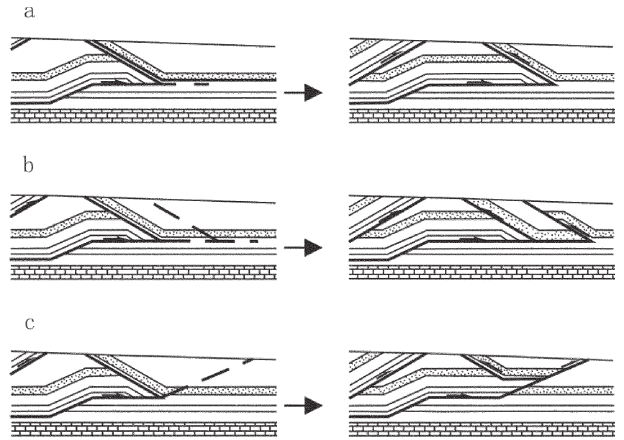


图6 三角带发展与破坏<sup>[31]</sup>

Fig. 6 Development and abandonment of triangle zones

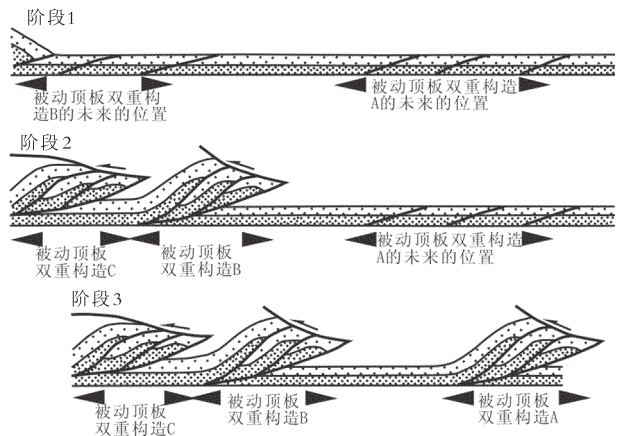


图7 三角带发展序列<sup>[23]</sup>

Fig. 7 Development sequence of triangle zones

层之间能干性的差异、平行于层的滑动和地层的相对厚度。能干性的岩石(如灰岩、白云岩和结晶砂岩)倾向于维持固定的层厚度,而非能干性的岩石(如蒸发岩、超压的页岩和页岩)变形的结果倾向于改变地层厚度<sup>[54]</sup>。非能干性地层在变形时经常起到滑脱层的作用<sup>[53]</sup>。在构造地层单元中地层能干性强弱的位置和厚度决定了滑脱层的位置和坡坪的几何形态<sup>[52]</sup>。在挤压条件下所形成的断坡与断坪一般分别沿着力学能干性强和能干性弱的地层发育<sup>[55]</sup>。

Morley<sup>[27]</sup>认为位于弱能干性地层之上的强能干性地层发生缩短导致被动顶板双重构造的产生。然而,Couzens等<sup>[12]</sup>总结了世界各地有三角带发育的褶皱冲断带,发现盖层的岩性以页岩和砂岩为主,而其下卷入双重构造变形的岩石主要为灰岩和白云岩,偶



尔包括结晶基底。盖层岩石总体上是弱能干性,弱于其下卷入双重构造的岩石单元。于是,Couzens 等<sup>[12]</sup>认为地层的力学性质是三角带形成和发展的一个控制性因素,盖层的能干性强度决定了三角带能否形成。

### 6.3 地层厚度及厚度变化

地层相对厚度差异也是三角带形成的重要控制因素。Couzens-Schultz<sup>[14]</sup>发现世界各地大多数三角带盖板层序的厚度都大于形成双重逆冲断夹块的厚度(图 8)。

按照临界锥角模型(critical taper models),如果逆冲楔体未达到临界角时,楔体不会整体向前移动而是在内部发生变形,从而使得楔体增厚并引起楔体顶角逐渐增大;而当楔体顶角大于临界角时,逆冲楔体将向前扩展以降低楔体顶角<sup>[56]</sup>。Mugnier 等<sup>[57]</sup>的对比实验表明,同构造沉积作用倾向于使褶皱冲断向前陆移动并形成大型的逆冲系统,而剥蚀作用则限制了褶皱冲断带向前的传播,并易于促进主要反冲断层的形成。Bonini<sup>[24,58]</sup>认为,随着盖层厚度增大,构造样式由向前传播褶皱(outward fold propagation)(图 9-a)向推进单斜(prograding monocline)(图 9-b)变化;磨拉石盆地中的同构造沉积有利于被动顶板双重构造样式的形成。

## 7 构造三角带的地震剖面识别与解释

由于三角带是石油、天然气、煤等能源资源的重要聚集场所,各国对三角带地区的构造做了大量的地震勘探和钻探<sup>[59]</sup>。三角带构造的识别主要依赖于地震反射剖面的质量。而较陡的或反转的地层、水平与垂直快速变化的地震波速度都会降低地震资料的质量。当滑脱层为膏盐时,膏盐岩与上下地层的波阻抗差很大、界面的反射系数大,使地震波往下传播的能量小,从而形成了较强的屏蔽作用。同时,塑性很强的膏盐岩对地震波的吸收也很强,使得下方目标

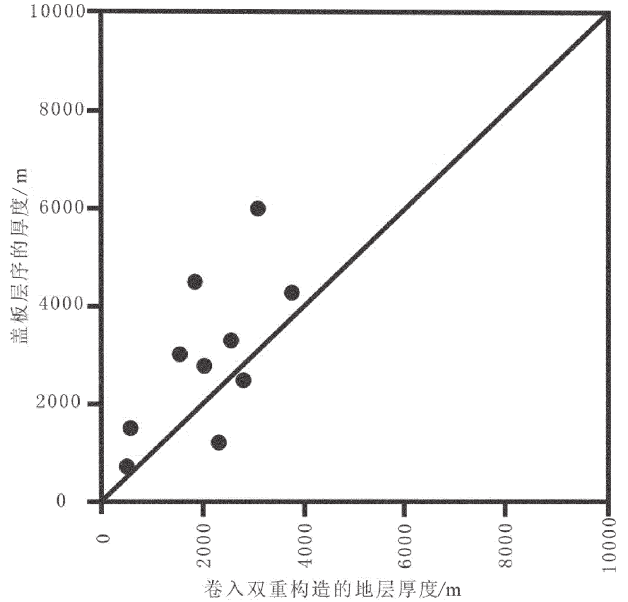


图 8 被动顶板双重构造实例中卷入双重构造变形的地层厚度与盖板地层厚度的关系<sup>[14]</sup>

Fig. 8 Correlation of the strata thickness related to the duplex and that of cover sequences in passive-roof duplexes cases

层地震资料的信噪比普遍较低<sup>[60]</sup>。早先地震解释人员通常将三角带构造解释为叠瓦式构造,出现了冲断带前的地层突然增厚,这在构造地质上是无法解释的。因此,应系统地从事三角带前缘到腹陆构造对三角带几何形态进行合理的解译<sup>[61]</sup>。本文介绍 2 种方法来帮助在地震剖面上识别和解释出构造三角带:生长地层方法和地震模拟方法。

### 7.1 生长地层方法

在构造复杂的地区地震勘探的信噪比往往很低,所以很多时候工作人员无法判别出是构造楔还是简单的断层转折褶皱。而生长构造(growth structures)则有助于区分构造楔和其他构造<sup>[11]</sup>。

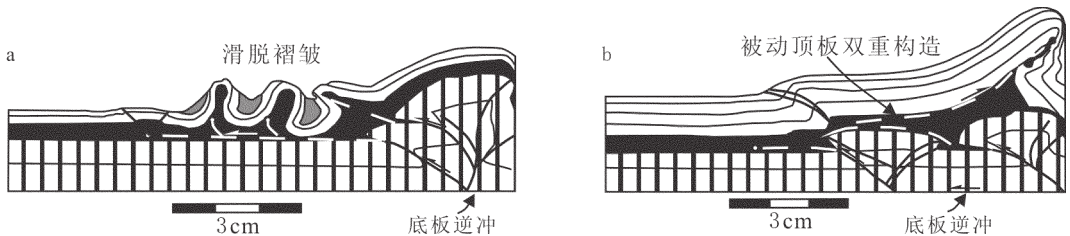


图 9 构造三角带的砂箱实验模拟<sup>[24]</sup>

Fig. 9 Sandbox experimental simulation of triangle zones

a—发育向前传播褶皱;b—发育推进单斜

断层相关褶皱理论是对上地壳脆性变形的运动学和几何学的深刻阐述<sup>[62]</sup>。自然界的情况往往非常复杂,要鉴定出三角带构造就要借助于记录地层变形历史的生长地层。褶皱在发育过程中,如果位于剥蚀面或局部剥蚀面以下,将接受同构造沉积,形成所谓的生长地层<sup>[20]</sup>。不同时期的沉积受隐伏活动构造的影响是不同的,先形成的沉积地层受到的变形多,后形成的沉积地层受到的变形少。所以,生长地层系统地记录了褶皱生长的全过程。因此,详细地分析同构造沉积的结构,辨别出生长地层就可能认识褶皱生长的详细过程。

依据断层相关褶皱理论,随着膝折带的传播沿着活跃轴面形成褶皱。当沉积速率大于隆升速率时,同构造沉积地层形成生长三角(growth triangles)。此时,构造楔上形成的生长三角由一个向斜的平直的活动轴面(active axial surface)和一个背斜的弯曲的固定轴面(inactive axial surface)为界(图10,模型W1);而简单的前翼断层转折褶皱所产生的生长三角则由一个弯曲的向斜固定轴面和一个背斜的平直活动轴面所围限(图10,模型F1)。当隆升速率大于沉积速率时,构造楔和简单断层转折褶皱之间的差别将更加明显。对于构造楔,生长地层以一个向斜的活动轴面褶皱(图10,模型W2);而简单的断层转折褶皱的同构造沉积地层没有发生褶皱,因为同沉积

地层没有经过一个活动轴面(图10,模型F2)<sup>[11]</sup>。

## 7.2 地震模拟技术

三角带是以复杂几何形态和变化的地震速度场为特征的。这些地区的地震剖面品质较差,主要是地震波能量穿过上覆层构造时传播速度发生差异,产生了地震盲区和变形的地震波组,从而使得地震资料难以解释。为了选取地震处理的参数(如偏移速度),并且减少构造解释中出现的模棱两可的情况,非常有必要了解这些地震事件中真实的地震波传播的情况。

地震波模拟技术是连接地质模型与地震剖面的纽带。它主要通过模拟地震波在地下的传播过程,研究地震波传播的特征与地下介质参数的关系,达到与实际地震剖面的最佳逼近,使地质解释人员能正确认识复杂条件下地震波的传播机理、传播规律和地震反射波场的特征,以达到验证地质解释方案的目的<sup>[63]</sup>。

Jardin 等<sup>[64]</sup>基于三角带的地质模型,应用地球物理2D/3D叠加速度,建立速度模型。用零炮检距和非零炮检距2种激发和接收方式来合成时间地震剖面。将合成的时间地震剖面与实际的时间地震剖面进行对比来确定可靠性。如果两者相差较大,则修改速度模型,直至满意为止。最后通过偏移归位,将时间地震剖面转化为深度剖面(图11)。作者将此方法应用到波兰 Carpathians 地区并取得了较好的效果<sup>[64]</sup>。

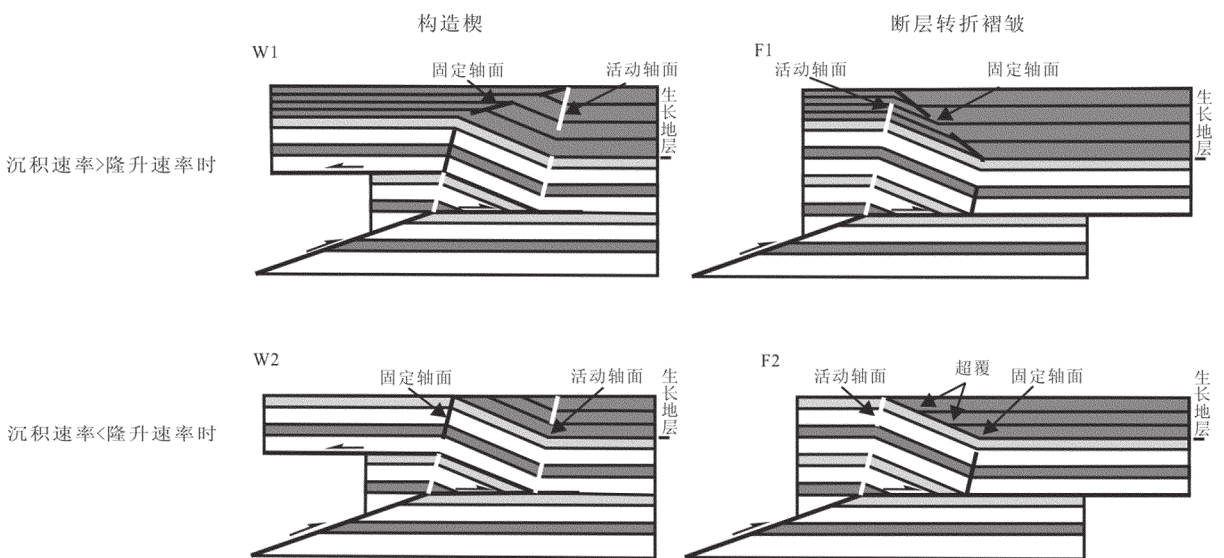


图10 构造楔与断层相关褶皱的不同的生长地层模型<sup>[11]</sup>

Fig. 10 Different strata-in-growth models of structural wedge and fault-bend fold

左列为与构造楔相关的生长地层模型 W1 和 W2,右列为与断层相关褶皱相关的生长地层模型 F1 和 F2



### 8 构造三角带的油气勘探意义

国外油气勘探成果显示,构造三角带油气资源丰富,成为重要的油气勘探目标。在中国,构造三角带普遍发育于西部挤压型盆地的周缘或造山带前陆构造带之下,是油气勘探的新领域。目前已发现的构造三角带主要位于下列盆地的盆山结合部位:四川盆地、塔里木盆地、准噶尔盆地、酒泉盆地、吐哈盆地等。

塔里木盆地库车前陆凹陷发育典型的三角带构造。该凹陷古近系为一套厚膏盐岩层,将库车前陆冲断带的新生代构造分为 3 个主要构造序列:盐上构造、盐构造和盐下构造。本文所列举的克拉苏三角带,以古近系的盐岩为顶板滑脱层,由数条切截白垩

系、中上侏罗统的向南的底板逆冲和一条发育在古近系膏盐岩下的南倾的被动顶板逆冲断层所组成<sup>[64-65]</sup>。盐下三角带构造的识别成为库车凹陷大中型气田勘探的关键,如克拉气田、依南气田等。逆冲断层切穿深部地层,其顶部消失在顶部滑脱层中,可以作为油气运移的良好通道或者起到封堵油气的作用。位于三角带之上的盖层能够形成很好的背斜构造圈闭。由于生储盖组合齐全,导油构造发育,且形成断夹块的逆冲隐伏于地下,因此库车再生前陆盆地的构造三角带中每个逆冲岩片或断夹块在适当的条件下都可以形成独立的圈闭<sup>[66]</sup>。这已被油气勘探所证明,如塔里木盆地克拉 2 大气田<sup>[64,67]</sup>(图 12-a)、依南气田<sup>[68]</sup>(图 12-b)等都位于三角带发育的位置。

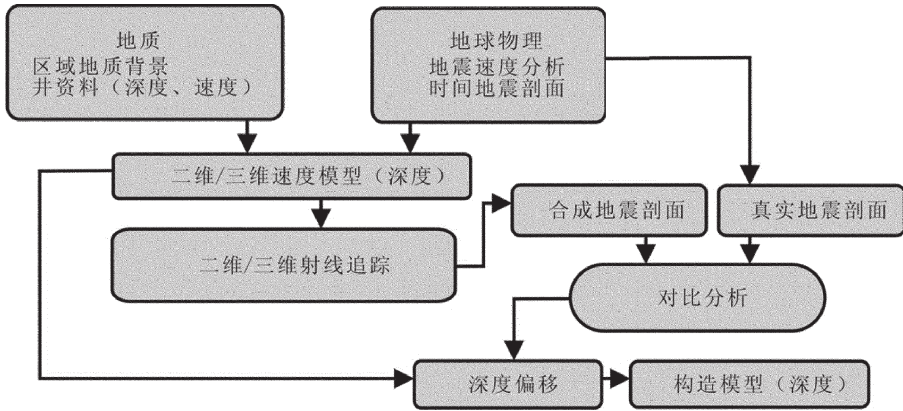


图 11 地震模拟流程图<sup>[60]</sup>

Fig. 11 Flow sheet of seismic simulation

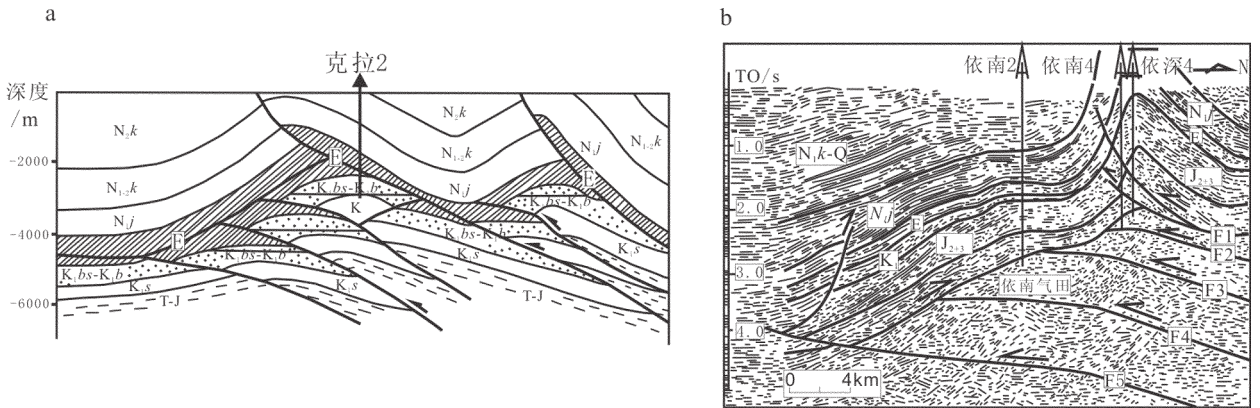


图 12 塔里木盆地中发育的三角带

Fig. 12 Triangle zones developed in Tarim basin

a—塔里木盆地克拉 2 大气田构造位置<sup>[67]</sup>;N<sub>1k</sub>—上新统库车组;N<sub>12k</sub>—中新统—上新统康村组;N<sub>j</sub>—中新统吉迪克组;E—古近系;  
K<sub>1bs</sub>—下白垩统巴什基奇克组;K<sub>1b</sub>—下白垩统巴西改组;K<sub>1s</sub>—下白垩统舒善河组;J—侏罗系;T—三叠系;  
b—塔里木盆地库车前陆凹陷依南气田位于构造三角带被动顶板双重构造之上<sup>[68]</sup>;Q—第四系;N<sub>1k</sub>—中新统康村组;  
N<sub>j</sub>、E 同图 a;K<sub>1</sub>—下白垩统;J<sub>2+3</sub>—中—上侏罗统

四川盆地是一个典型的克拉通盆地，其周缘被前陆构造带所包围，盆山结合部发育良好的三角带构造。川北地区的大巴山-米仓山前陆构造带均发育三角带构造。米仓山前陆带反冲断层和三角带构造带呈近东西向展布于米仓山南缘推覆构造带与米仓山前陆盆地之间，即旺苍北-南江-两河口一带，在地表和地震剖面上均可见飞仙关组膏岩层之上的地层向米仓山方向的反冲<sup>[69]</sup>(图 13-a)。大巴山前陆带位于四川盆地与大巴山接合部位。地震勘探显示，大巴山前陆的构造三角带发育于铁溪-巫溪隐伏断裂之下(图 13-b)。被动顶板逆冲断层沿中下三叠统富膏盐层发育，其上的盖板层序由三叠系和侏罗系-白垩系构成，底板冲断层发育于下寒武统炭质泥页岩软弱层中，断夹块由二叠系和下古生界海相地层组成<sup>[70-71]</sup>。由于地震剖面品质较差，三角带内构造图像(冲断层、断夹块等)难以清晰地识别。因而，对于三角带的细节还存在争议，如李岩峰等<sup>[72]</sup>认为顶板滑脱层为嘉陵江组-雷口坡组膏盐，底板滑脱

层为志留系厚层泥页岩。

四川盆地西部的龙门山北段发育良好的三角带构造(图 13-c)。沿矿山梁构造带发育的三角带是以前震旦系基底滑脱层为底板滑脱层，以三叠系嘉陵江组-雷口坡组盐岩为顶板滑脱层，叠加在早期中生代变形的基础上形成的<sup>[73-75]</sup>。

川东褶皱带具有多套滑脱层，由下往上分别为震旦系冰碛岩、寒武系页岩和中下志留统页岩、细粒砂岩。三角带的上下滑脱层分别为寒武系和志留系的滑脱层或者是寒武系和震旦系的滑脱层<sup>[34-35]</sup>(图 13-d)。

西昆仑齐姆根构造带发育的三角带以古近系底界的膏泥岩层为顶滑脱层，以古生界底面的厚层泥岩(寒武系)为底滑脱层。深部的双重构造向上切入新生界，并以源于古近系底面的反冲断层作为终止进一步向前发展的调节构造<sup>[76]</sup>(图 14-a)。准噶尔盆地南缘清水河背斜下发育的三角带以中侏罗统西山窑组煤层为顶板滑脱层，滑脱层之上的中-新生界

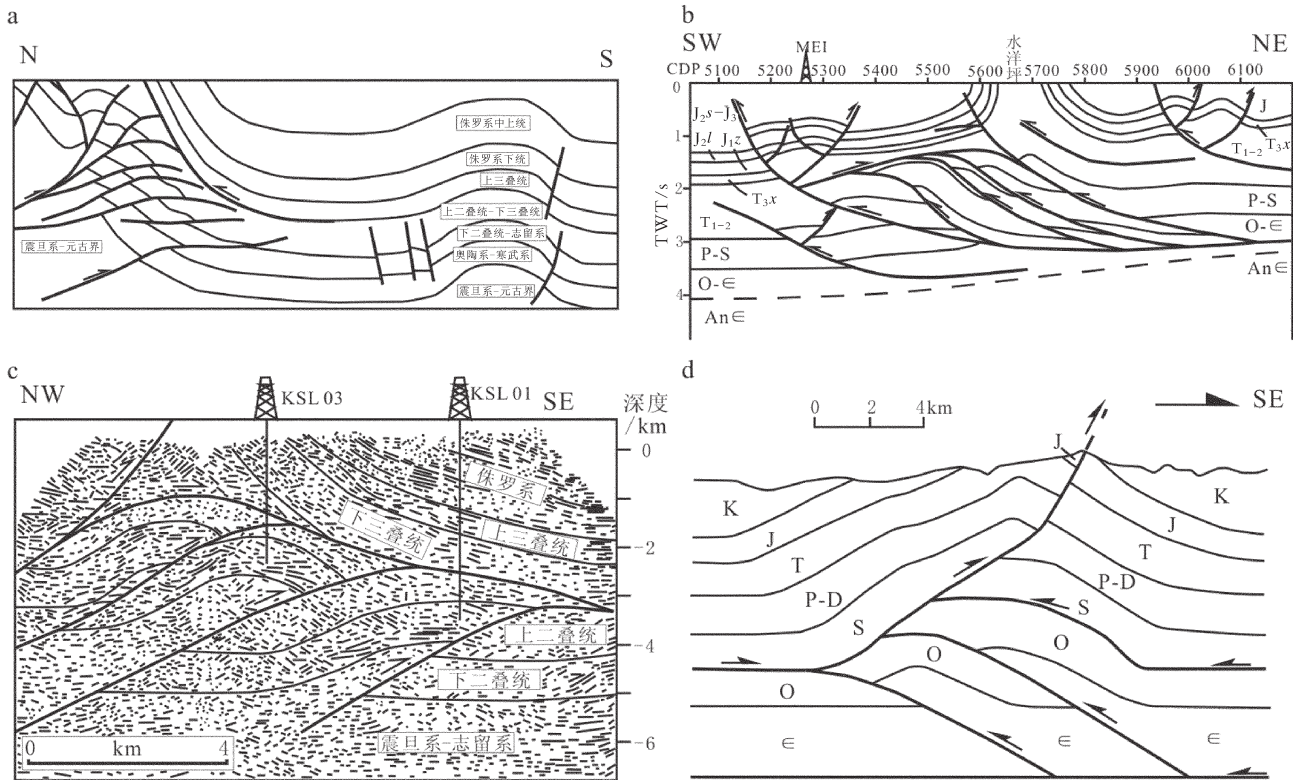


图 13 四川盆地周缘盆山结合部发育的三角带构造

Fig. 13 Triangle zones in basin-mountain transitional area in the periphery of Sichuan basin

a—米仓山前陆剖面<sup>[69]</sup>; b—大巴山前陆剖面<sup>[70]</sup>; c—龙门山北段矿山梁构造剖面<sup>[73]</sup>; d—川东剖面<sup>[34]</sup>

J<sub>3s</sub>-J<sub>3</sub>—中侏罗统沙溪庙组-上侏罗统; J<sub>2l</sub>-中侏罗统凉山组; J<sub>1z</sub>-下侏罗统自流井组; T<sub>3x</sub>—上三叠统须家河组; T<sub>1-2</sub>—下-中三叠统; P—二叠系; S—志留系; O—奥陶系; ε—寒武系; Anε—前寒武系; K—白垩系; J—侏罗系; T—三叠系; D—泥盆系

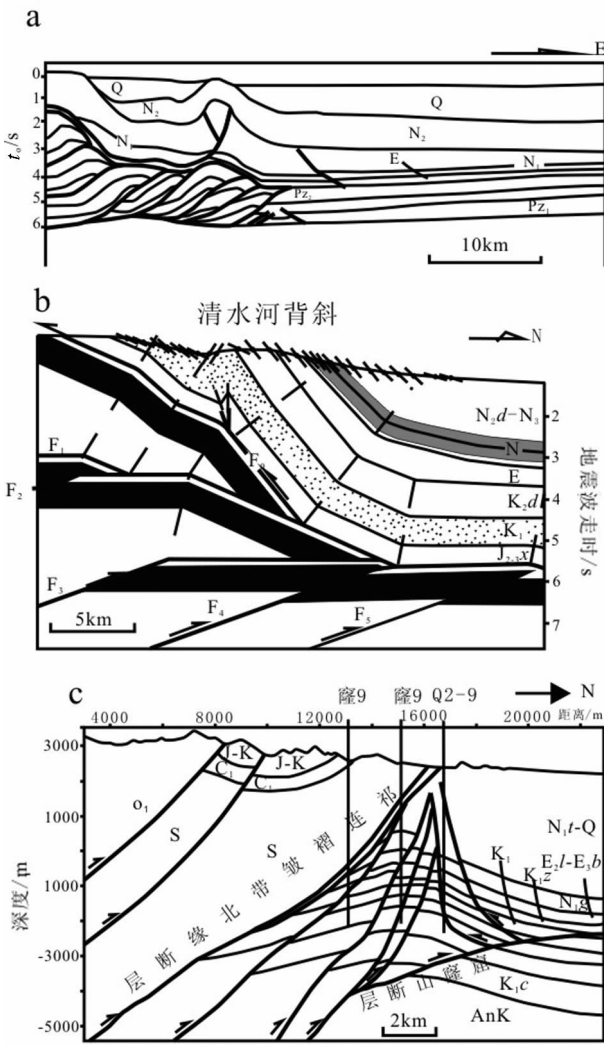


图 14 西部其他盆地的部分三角带实例

Fig. 14 Some triangle zones examples in other basins of West China

a—西昆仑齐姆根构造带剖面<sup>[76]</sup>; b—准噶尔盆地南缘清水河剖面<sup>[77]</sup>; c—酒泉盆地窟窿山前缘剖面<sup>[80]</sup>

Q—第四系; N<sub>2</sub>—上新统; N<sub>1</sub>—中新统; E—古近系; P<sub>z1</sub>—上古生界; P<sub>z2</sub>—下古生界; N<sub>2b</sub>-Q<sub>p</sub>—上新统独山子组-更新统; N—新近系; K<sub>2d</sub>—上白垩统东沟组; K<sub>1</sub>—下白垩统; J<sub>2-3x</sub>—中-上侏罗统西山窑组; N<sub>1t</sub>—中新统牛牯套组; N<sub>1g</sub>—中新统弓形山组; E<sub>3b</sub>—渐新统白杨河组; E<sub>2d</sub>—始新统柳沟庄组; K<sub>1z</sub>—下白垩统中沟组; K<sub>1c</sub>—下白垩统赤金堡组; j—侏罗系; AnK—前白垩系; C<sub>1</sub>—下石炭统; O<sub>1</sub>—下奥陶统; S—志留系

地层序列由盆地向山前被抬升的幅度超过 6000m, 形成一巨大的单斜构造<sup>[77-78]</sup>(图 14-b)。酒泉盆地窟窿山前缘三角带的底板逆冲卷入下白垩统和上侏罗统, 呈前展式依次冲断、楔入顶板滑脱层下, 使得下

白垩统中沟组及其上的地层逐渐抬升(图 14-c)。由于断尖处应力的不断集中, 上覆中沟组顶部高孔隙液压带产生反向断层, 构成典型的冲断三角带<sup>[79-80]</sup>。

总之, 前陆地区三角带构造将是今后一个时期中国陆上油气勘探的一个重要领域, 完善三角带构造地质理论, 对于指导该类型油气勘探具有重要的实践意义。

参考文献

[1]Mackay P A, Varsek J L, Kubli T E, et al. Triangle zones and tectonic wedges: an introduction[J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 1996, 44: 1-5.

[2]Gordy P L, Frey F R, Norris D K. Geological Guide for the CSPG 1977 Waterton-Glacier Park Field Conference[M]. Canadian Society of Petroleum Geologists, Calgary, 1977: 1-93.

[3]Fallot P. Les chevauchements intercutanés de Roya (Alpes-Maritimes)[M]. Annales Hébert et Haug, Laboratoire Géologie de la Faculté de Sciences, Université de Paris, 1949, 7: 161-170.

[4]Charlesworth H A K, Gagnon L G. Intercutaneous wedges, the triangle zone, and structural thickening of the Mynheer coal seam at Coal Valley in the Rocky Mountain Foothills of central Alberta[J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 1985, 33: 22-30.

[5]Roeder D H. Rocky Mountains: Der Geologische Aufbau des Kanadischen Felsengebirges[M]. Borntraeger, Berlin, 1967:318.

[6]McMechan M E. Low-taper triangle zone geometry: an interpretation for the Rocky Mountain Foothills, Pine Pass-Peace River area, British Columbia [J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 1985, 33: 31-38.

[7]Banks C J, Warburton J. 'Passive-roof' duplex geometry in the frontal structures of the Kirthar and Sulaiman mountain belts, Pakistan [J]. Journal of Structural Geology, 1986, 8: 229-237.

[8]Price R A. The southeastern Canadian Cordillera: thrust faulting, tectonic wedging, and delamination of the lithosphere[J]. Journal of Structural Geology, 1986, 8: 239-254.

[9]Lawton D C, Spratt D A, Hopkins J C. Tectonic wedging beneath the Rocky Mountain foreland basin, Alberta, Canada[J]. Geology, 1994, 22: 519-522.

[10]Groschong R H Jr, Usdansky S I. Kinematic models of plane-roofed duplex styles[J]. Geological Society of America, Special Paper, 1988, 222: 197-206.

[11]Shaw J H, Connors C, Suppe J. Seismic interpretation of contractional fault-related folds: An AAPG seismic atlas[M]. American Association of Petroleum Geologists Studies in Geology, 2005: 52-55.

[12]Couzens B A, Wiltschko D V. The control of mechanical stratigraphy on the formation of triangle zones[J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 1996, 44: 165-179.

[13]Butler R W H. The terminology of structures in thrust belts [J]. Journal of Structural Geology, 1982, 4: 239-245.



- [14] Couzens-Schultz B A. The Effects of Mechanical Stratigraphy on the Origin of Triangle Zones in Thrust Belts[D]. Ph.D. dissertation, Texas A & M University, College Station, TX, 1997: 1-39.
- [15] 梅廉夫, 戴少武, 沈传波, 等. 中、下扬子区中、新生代陆内对冲带的形成及解体[J]. 地质科技简报, 2008, 27(4): 1-7.
- [16] Chen A. Mirror-image thrusting in the South China Orogenic Belt: tectonic evidence from western Fujian, southeastern China [J]. Tectonophysics, 1999, 305: 497-519.
- [17] Barnes P M, Nicol A. Formation of an active thrusts triangle zone associated with structural inversion in a subduction setting, eastern New Zealand [J]. Tectonics, 2004, 23, TC1015, doi:10.1029/2002TC001449.
- [18] Stockmal G S, Lebel D, McMechan M E, et al. Structural style and evolution of the triangle zone and external Foothills, southwestern Alberta: Implications for thin-skinned thrust-and-fold belt mechanics [J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 2001, 49: 472-496.
- [19] Couzens-Schultz B A, Vendeville B C, Wilschko D V. Duplex style and triangle zone formation: insights from physical modeling [J]. Journal of Structural Geology, 2003, 25: 1623-1644.
- [20] Zapata T R, Allmendinger R W. Thrust-front zone of the Pre-cordillera, Argentina: A thick-skinned triangle zone [J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1996, 80: 359-381.
- [21] Jones P B. Oil and gas beneath east-dipping underthrust faults in the Alberta Foothills [C] // Powers R B. Geologic Studies of the Cordilleran Thrust Belt 1. Rocky Mountain Association of Petroleum Geologists, 1982: 61-74.
- [22] Jones P B. Triangle zone geometry, terminology and kinematics [J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 1996, 44: 139-152.
- [23] Cooper M. Passive-roof duplexes and pseudo-passive-roof duplexes at mountain fronts: a review [J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 1996, 44: 410-421.
- [24] Bonini M. Deformation patterns and structural vergence in brittle-ductile thrust wedges: An additional analogue modeling perspective [J]. Journal of Structural Geology, 2007, 29: 141-158.
- [25] Dahlstrom C D A. Structural geology in the eastern margin of the Canadian Rocky Mountains [J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 1970, 18: 332-406.
- [26] Boyer S E, Elliott D. Thrust systems [J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1982, 66: 1196-1230.
- [27] Morley C K. A classification of thrust fronts [J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1986, 70: 12-25.
- [28] Martinez-Torres L M, Ramon-Lluch R, Eguiluz L. Tectonic wedges: geometry and kinematic interpretation [J]. Journal of Structural Geology, 1994, 16: 1491-1494.
- [29] Varsek J L. Structural wedges in the Cordilleran crust, southwestern Canada [J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 1996, 44: 349-362.
- [30] Moore V M, Wilschko D V. Syncollisional delamination and tectonic wedge development in convergent orogens [J]. Tectonics, 2004, 23, TC2005, doi:10.1029/2002TC001430.
- [31] Jamison W R. Mechanical stability of the triangle zone: the back-thrust wedge [J]. Journal of Geophysical Research, 1993, 98: 20015-20030.
- [32] Laubscher H P. Fold development in the Jura [J]. Tectonophysics, 1977, 37: 337-362.
- [33] Echavarría L, Hernández R, Allmendinger R, et al. Subandean thrust and fold belt of northwestern Argentina: Geometry and timing of the Andean evolution [J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 2003, 87: 965-985.
- [34] Yan Danping, Zhou Meifu, Song Honglin, et al. Origin and tectonic significance of a Mesozoic multi-layer over-thrust system within the Yangtze Block (South China) [J]. Tectonophysics, 2003, 361: 239-254.
- [35] Yan Danping, Zhang Bing, Zhou Meifu, et al. Constraints on the depth, geometry and kinematics of blind detachment faults provided by fault-propagation folds: An example from the Mesozoic fold belt of South China [J]. Journal of Structural Geology, 2009, 31: 150-162.
- [36] Jardin A, Chaker R, Krzywiec P. Understanding Seismic Propagation through Triangle Zones [C] // Lacombe O, Lavé J, Roure F, et al. Thrust Belts and Foreland Basins - From Fold Kinematics to Petroleum Systems. New Frontiers in Earth Sciences, Springer Verlag, 2007: 61-72.
- [37] Jamison W R. Mechanical models of triangle zone evolution [J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 1996, 44: 180-194.
- [38] Erickson S G. Mechanics of triangle zones and passive-roof duplexes: implications of finite element models [J]. Tectonophysics, 1995, 245: 1-11.
- [39] Couzens-Schultz B A, Wilschko D V. The control of the smectite-illite transition on passive-roof duplex formation: Canadian Rockies Foothills, Alberta [J]. Journal of Structural Geology, 2000, 22: 207-230.
- [40] Skuce A G. Frontal Foothills structures in central Alberta: the thin end of the intercutaneous wedge? [J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 1996, 44: 153-164.
- [41] Smart K J, Dunne W M. Roof sequence response to emplacement of the Wills Mountain duplex: the roles of forethrusting and scales of deformation [J]. Journal of Structural Geology, 1997, 19: 1443-1459.
- [42] Liu Shumin, Lawton D C, Spratt D A. Three-dimensional geometry of the structural front between Berland River and Smoky River, central Alberta Foothills [J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 1996, 44: 299-312.
- [43] Lebel D, Langenberg W, Mountjoy E W. Structure of the central Canadian Cordilleran thrust-and-fold belt, Athabasca-Brazeau area, Alberta: a large, complex intercutaneous wedge [J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 1996, 44: 282-298.
- [44] Davis D, Engelder T. The role of salt in fold-and-thrust belts [J]. Tectonophysics, 1985, 119: 67-88.

- [45]Sherkati S, Letouzey J, D Frizon de Lamotte. Central Zagros fold-thrust belt (Iran): New insights from seismic data, field observation, and sandbox modeling[J]. *Tectonics*, 2006, 25, TC4007, doi: 10.1029/2004TC001766.
- [46]Costa E, Vendeville B C. Experimental insights on the geometry and kinematics of fold-and-thrust belts above weak, viscous evaporitic décollement[J]. *Journal of Structural Geology*, 2002, 24: 1729-1739.
- [47]Koyi H, Sans M. Deformation transfer in viscous detachments: comparison of sandbox models to the South Pyrenean Triangle Zone[C]//Buiter S J H, Schreurs G. *Analogue and Numerical Modelling of Crustal-Scale Processes*. Geological Society of London Special Publication, 2006, 253: 117-134.
- [48]Krzywiec P, Vergés J. Role of the foredeep evaporites in wedge tectonics and formation of triangle zones: comparison of the Carpathian and Pyrenean Thrust Fronts[C]//Lacombe O, Lavé J, Roure F, et al. *Thrust belts and foreland basins—from fold kinematics to petroleum systems*. New Frontiers in Earth Sciences, Springer Verlag, 2007: 383-394.
- [49]陈庆宣,王维襄,孙叶等.地质力学的方法与实践——岩石力学与构造应力场分析[M].北京:地质出版社,1998:1-44.
- [50]Gross M R, Gutiérrez-Alonso G, Bai Taixu, et al. Influence of mechanical stratigraphy and kinematics on fault scaling relations[J]. *Journal of Structural Geology*, 1997, 19(2): 171-183.
- [51]Chester J S. Mechanical stratigraphy and fault-fold interaction, Absaroka thrust sheet, Salt River Range, Wyoming[J]. *Journal of Structural Geology*, 2003, 25: 1171-1192.
- [52]Missenard Y, Taki Z, Dominique Frizon de lamotte, et al. Tectonic styles in the Marrakesh High Atlas (Morocco): The role of heritage and mechanical stratigraphy[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2007, 48: 247-266.
- [53]Ferrill D A, Morris A P. Fault zone deformation controlled by carbonate mechanical stratigraphy, Balcones fault system, Texas[J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 2008, 92: 359-380.
- [54]Groshong R H Jr. 3-D Structural Geology[M]. Springer-Verlag, Heidelberg, 2006: 1-32.
- [55]Cook F A, Vasek J L. Orogen-scale décollements[J]. *Reviews of Geophysics*, 1994, 32: 37-60.
- [56]Davis D M, Suppe J, Dahlen F A. Mechanics of fold-and-thrust belts and accretionary wedges[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1983, 88: 1153-1172.
- [57]Mugnier J L, Baby P, Colletta B, et al. Thrust geometry controlled by erosion and sedimentation: a view from analogue models[J]. *Geology*, 1997, 25: 427-430.
- [58]Bonini M. Passive roof thrusting and forelandward fold propagation in scaled brittle-ductile physical models of thrust wedges[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106: 2291-2311.
- [59]Skuce A G, Goody N P, Maloney J. Passive-roof duplexes under the Rocky Mountain foreland basin, Alberta[J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1992, 76: 67-80.
- [60]徐峰,马在田.库车拗陷盐下含油气构造地震勘探的关键技术[J].*天然气工业*,2003,23(3):13-43.
- [61]Xu Chunming, Zhou Xinyuan. Seismic interpretation of the Kelasu triangle zone in the southern Tian Shan foothills, northwestern China[J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 2007, 91: 161-171.
- [62]Suppe J. Geometry and kinematics of fault-bend folding[J]. *American Journal of Sciences*, 1983, 283: 684-721.
- [63]陈耿毅,余钦范,蔡希玲,等.地震模拟技术新进展——第67届EAGE年会论文综述[J].*勘探地球物理进展*,2005,28(6):439-448.
- [64]杨明慧,金之钧,吕修祥,等.库车褶皱冲断带克拉苏三角带及其油气潜力[J].*地球科学*,2002,27(6):745-750.
- [65]Tang Liangjie, Jia Chengzao, Jin Zhijun, et al. Salt tectonic evolution and hydrocarbon accumulation of Kuqa foreland fold belt, Tarim Basin, NW China[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2004, 41: 97-108.
- [66]刘志宏,卢华复,贾承造,等.库车再生前陆盆地的构造与油气[J].*石油与天然气地质*,2001,22(4):297-303.
- [67]贾承造,顾家裕,张光亚.库车拗陷大中型气田形成的地质条件[J].*科学通报*,2002,47(增刊):49-55.
- [68]何光玉,卢华复,李树新,等.库车盆地依南气田构造变形特征及动力学机制[J].*北京大学学报(自然科学版)*,2004,40(2):247-252.
- [69]刘殊.前陆褶皱冲断带构造特征研究——以米仓山、龙门山前陆盆地及其褶皱带为例[D].中国地震局地质研究所,2007:77-84.
- [70]李智武,刘树根,罗玉宏,等.南大巴山前陆冲断带构造样式及变形机制分析[J].*大地构造与成矿学*,2006,30(3):294-304.
- [71]刘树根,李智武,刘顺,等.大巴山前陆盆地-冲断带的形成演化[M].北京:地质出版社,2006:89-90.
- [72]李岩峰,曲国胜,刘殊,等.米仓山、南大巴山前缘构造特征及其形成机制[J].*大地构造与成矿学*,2008,32(3):285-292.
- [73]Jia Dong, Wei Guoqi, Chen Zhuxin, et al. Longmen Shan fold-thrust belt and its relation to the western Sichuan Basin in central China: New insights from hydrocarbon exploration[J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 2006, 90: 1425-1447.
- [74]陈竹新,贾东,魏国齐,等.龙门山北段矿山梁构造解析及其油气勘探[J].*地学前缘*,2005,12(4):445-450.
- [75]汤良杰,杨克明,金文正,等.龙门山冲断带多层次滑脱带与滑脱构造变形[J].*中国科学(D辑)*,2008,38(增刊):30-40.
- [76]肖安成,杨树锋,陈汉林,等.西昆仑山前冲断系的结构特征[J].*地学前缘*,2000,7(增刊):128-136.
- [77]管树巍,李本亮,何登发,等.复杂构造解析中的几何学方法与应用[J].*地质科学*,2007,42(4):722-739.
- [78]董臣强,孙自明,洪太元.准噶尔盆地南缘前陆褶皱冲断带构造滑脱层厘定[J].*石油实验地质*,2007,29(2):138-142.
- [79]吴奇之,王同和,李明杰,等.中国油气盆地构造演化与油气聚集[M].北京:石油工业出版社,1997:273-274.
- [80]潘良云,孙星,孙学栋,等.酒泉盆地窟窿山构造特征与油气成藏规律[J].*石油地球物理勘探*,2007,42(1):115-119.