文章编号：1000-0747(2013)01-0066-13

中国中西部前陆冲断带运动学分类、模型与勘探领域

管树巍[1,2]，何登发[3]，雷永良[1,2]，陈竹新[1,2]

（1. 盆地构造与油气成藏重点实验室；2. 中国石油勘探开发研究院；3. 中国地质大学（北京）海相储集层演化与油气富集机理教育部重点实验室）

基金项目：国家自然科学基金（41172183）；国家科技重大专项课题（2008ZX05003-001）

摘要：根据冲断系统内断层位移传递和消减的方式，将中国中西部前陆冲断带划分为 4 类：①Ⅰ型前陆冲断带，断层位移沿滑脱面全部传递至盆地内部，根据冲断构造规模和结构，又可分为库车型、川西南型和酒泉型 3 个亚类；②Ⅱ型前陆冲断带，以准噶尔盆地南缘为代表，冲断带内既存在向盆地方向传递的位移，也存在向造山带方向消减的位移；③Ⅲ型前陆冲断带，以塔西南甫沙冲断带为代表，断层位移全部沿着深部构造楔顶部的反冲断面向造山带方向消减；④复杂边界制约下的前陆冲断带，主要发育在柴西南和柴北缘，冲断系统内断层位移的传递受柴达木盆地形态和周缘边界限制，以至没有形成稳定的前陆区和前陆盆地特有的楔形沉积结构。通过中西部前陆冲断带运动学分类和复杂构造建模，提出并论证了准噶尔盆地南缘深层叠加构造楔形体、川西北寒武系倒转推覆体下的晚古生代被动陆缘层序、库车中段—东段的煤下构造以及准噶尔盆地西北缘下盘掩伏构造 4 个勘探新领域。图 14 表 2 参 59

关键词：前陆冲断带；复杂构造解析；运动学分类；构造模型；恢复应变；中国中西部

中图分类号：TE122.1 文献标识码：A

Kinematic classification, structural modeling and prospective fields of the foreland thrust belts in Midwest China

Guan Shuwei[1,2], He Dengfa[3], Lei Yongliang[1,2], Chen Zhuxin[1,2]

(1. *Key Laboratory of Basin Structure and Petroleum Accumulation, PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing* 100083, *China*; 2. *PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing* 100083, *China*; 3. *Key Laboratory of Marine Reservoir Evolution and Hydrocarbon Accumulation Mechanism of the Ministry of Education, China University of Geosciences, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: According to the distribution and transfer directions of thrust displacements under which the size, shape and pattern of thrust belt are controlled, the foreland thrust belts are classified into four types in middle and western China: (1) Type I, all the fault displacements in the thrust belt transfer from the mountain front to the basin along detachment. This type is the most popular in central and western China and can be divided into three subtypes: Kuche type, southwestern Sichuan type and Jiuquan type. (2) Type II, represented by southern Junggar Basin, in which there are fault displacements transferring to both basin and orogenic belt directions. (3) Type III, represented by Fusha thrust belt in southwestern Tarim Basin, in which all the fault displacements transfer toward the mountain front as deep structural wedges propagating toward the basin direction. (4) Type IV, represented by southwestern and northern Qaidam Basin, in which the transfer of fault displacements is restrained by the size, shape and boundary of the basin, and the stable foreland part and typical wedge sedimentary structure not produced. On basis of the above four types and the modeling of complicated structures, four new exploration areas are identified: the deep imbricate structural wedges in southern Junggar Basin, late Paleozoic passive continental margin sequence under the reverse Cambrian nappe in northwestern Sichuan, under-coal structures in middle and eastern Kuche, and footwall covered structures in northwestern Junggar Basin.

Key words: foreland thrust belt; complex structural analysis; kinematic classification; structural modeling; restoration strain; Midwest China

0 引言

前陆冲断带位于造山带与盆地之间的过渡部位，是造山带向盆地方向大规模逆冲推覆形成的冲断系统[1]。目前对于前陆冲断系统的理论研究主要集中在两个方面：一是冲断推覆体的成因机制，早期认识到孔隙流体压力对推覆体长距离运移起关键作用[2]，20 世纪 80 年代，Davis 提出用临界楔形体（Critical wedge）

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

模型解释大规模冲断推覆的成因[3]，Dahlen 等利用黏性库仑楔理论（Cohesive Coulomb theory）与临界锥顶角（Critical taper）进一步解释前陆冲断带与增生楔的运动学机制与演化历史[4-6]，Suppe 将其发展成为“软断层、强构造楔”理论模型[7]；二是前陆冲断带构造几何学和运动学研究正趋于定量化，近 30 年来，Suppe 及其他研究者不但建立了断层转折褶皱、断层传播褶皱和滑脱褶皱等基本端元模型[8-10]，也建立并完善了基于端元模型的三角剪切断层传播褶皱、剪切断层转折褶皱、基底卷入式构造、构造楔、叠加构造、双重构造、位移转换构造与干涉构造等断层相关褶皱模型[11-20]，并将同构造沉积、隆升、剥蚀等与断裂作用和褶皱作用相结合，探讨它们之间相互作用以及彼此制约的内在机制[16,21-22]，这些成果不仅拓展了断层相关褶皱分析方法研究的内涵和应用范围，也为前陆冲断带复杂构造解析与建模提供了理论依据。

由于断层相关褶皱理论合理地解释了低温和非变质条件下上地壳的脆性构造变形，因此其分析方法对于这一类构造的解析与建模具有最普遍和最有效的约束[23-26]。但断层相关褶皱分析单纯以构造变形的几何学参数作为依据，而对于实际构造的承载者——地层的力学结构则没有涉及。大量研究实例表明，构造变形样式与地层力学结构的关系可能更为紧密，其发育过程和变形机制主要受卷入变形地层特别是相邻地层之间的强度对比控制[26-29]。此外，断层相关褶皱分析对于走滑构造、斜向挤压构造和盐构造等需要在三维空间内观测的构造变形亦不适用。因此，近年来前陆冲断带复杂构造解析工作除继续重视传统的单剖面建模研究外，也加强了对地层岩石力学性质、构造变形方式与构造生长过程关系的数值模拟及其三维可视化表达的探索，在利用地震、钻井、地表地质和遥感资料进行三维构造建模方面取得了重要研究进展[23,26-29]。

中国中西部前陆冲断带分布在广阔的环青藏高原弧型地带，是印支期中国大陆主体形成后在燕山期和喜马拉雅期其南侧陆缘板块碰撞和拼贴导致的陆内构造变形的结果，其中印支—燕山期冲断带主要分布于准噶尔盆地西北缘、鄂尔多斯盆地西缘和四川盆地西缘，喜马拉雅期前陆冲断带主要分布于塔里木盆地周缘、柴达木盆地周缘、准噶尔盆地南缘和酒泉盆地南缘等地区[1,30-33]。中国中西部前陆冲断带具有形成大气田的有利大地构造背景，构造圈闭发育，油气勘探潜力巨大，虽然近 10 多年来的勘探取得了一些重大成果，但仍存在一些亟待解决的基础地质问题和技术难题，制约着勘探的进程[34]。本文着重论述了中西部前陆冲断带的运动学机制与分类，以期解决不同类型冲断系统内复杂构造圈闭的成因机制和形成分布等基础地质认识问题；在此基础上，针对与前陆冲断带油气勘探密切相关的复杂构造解释、描述与定量评价等技术难题，介绍了近年来发展起来的三维构造建模技术及其应用，通过典型冲断带的复杂构造建模探索一些重要勘探领域，并对中西部前陆冲断带未来研究方向进行了展望。

1 中国中西部前陆冲断带的运动学机制与分类

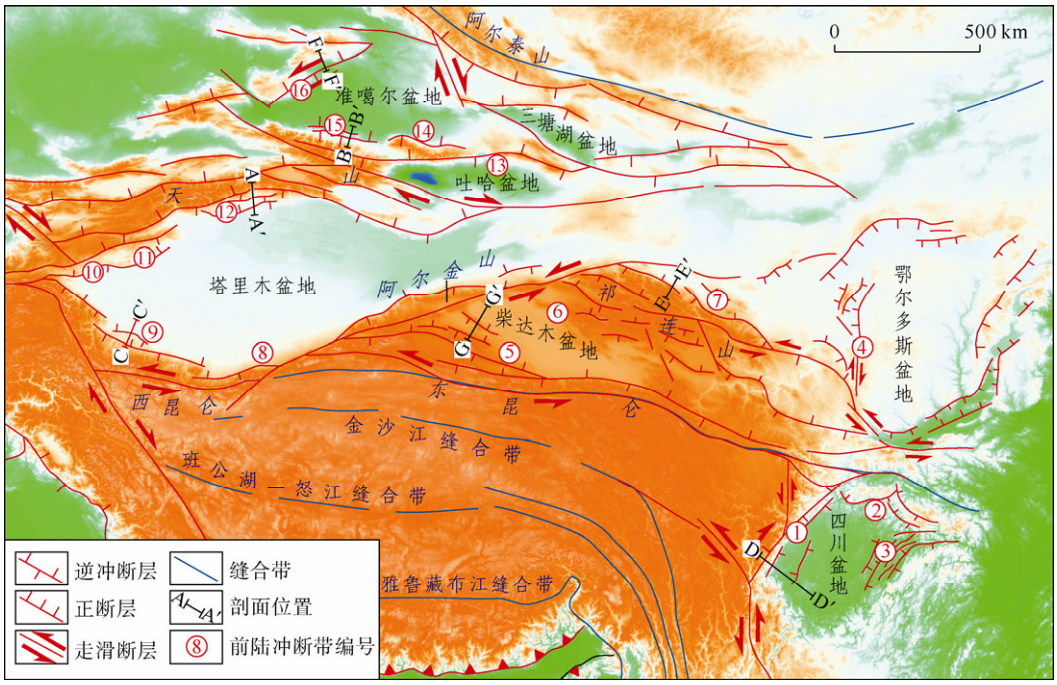
中西部前陆冲断带位置见图 1。多层次拆离滑脱和水平缩短是中国中西部前陆冲断带最重要的运动学机制，虽然不同层次和不同序次的冲断构造在叠加过程中呈现出复杂的关系，但整个冲断系统内断层位移的传递、消减以及由此引发的构造变形都可用图 2 中的 3 个模型进行分类。在图 2a 模型中，构造 A 内的断层位移全部沿反冲断面 F_0 向后消减，其中部分位移切割了上覆地层，在构造 A 的前翼形成构造 A-1，由于没有位移量向前传递，因此构造 A 前侧没有发生构造变形，这种机制下构造 A 内部各断块完全表现为构造楔作用；在图 2b 模型中，有 10 km 的断层位移向前传递，并在构造 A 的前侧形成了构造 B，按位移量平衡原则[8]，26 km 的位移量沿着反冲断面 F_0 向后消减，这种机制下构造 A 内部各断块不完全表现为构造楔作用；在图 2c 模型中，36 km 的断层位移全部向前传递，在构造 A 的前侧形成了构造 B、构造 C、构造 D 等，这种机制下反冲断层 F_0 是不存在的。因此，断层位移传递和消减的方式控制了前陆冲断带的宽度、规模以及内部构造的形成和分布。根据这 3 个模型可以从运动学的角度将中国中西部前陆冲断带划分为 4 个类型：Ⅰ型前陆冲断带、Ⅱ型前陆冲断带、Ⅲ型前陆冲断带和复杂边界制约下的前陆冲断带（见表 1、图 3）。

1.1 Ⅰ型前陆冲断带

Ⅰ型前陆冲断带的运动学机制可用图 2c 模型表示，冲断带内的断层位移沿着一个或多个滑脱面全部传递至盆地内部，由此引起的冲断构造规模大、延伸远。Ⅰ型冲断带主要发育在天山南麓的库车—柯坪—喀什一线以及帕米尔北缘、鄂尔多斯盆地西缘、四川

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

盆地西缘、准噶尔盆地西北缘和酒泉盆地南缘等地区，是中国中西部最普遍的一类前陆冲断带。



①四川盆地西缘中生代前陆冲断带；②四川盆地北缘中生代前陆冲断带；③四川盆地东缘中生代前陆冲断带；④鄂尔多斯盆地西缘中生代前陆冲断带；⑤柴达木盆地西南缘新生代前陆冲断带；⑥柴达木盆地北缘新生代前陆冲断带；⑦酒泉盆地南缘新生代前陆冲断带；⑧塔里木盆地东南缘古生代前陆冲断带；⑨塔里木盆地西南缘新生代前陆冲断带；⑩塔里木盆地西北缘喀什新生代前陆冲断带；⑪塔里木盆地西北缘柯坪新生代前陆冲断带；⑫塔里木盆地北缘新生代库车前陆冲断带；⑬吐哈盆地北缘新生代前陆冲断带；⑭博格达山前新生代前陆冲断带；⑮准噶尔盆地南缘新生代前陆冲断带；⑯准噶尔盆地西北缘中生代前陆冲断带

图 1 中国中西部前陆冲断带分布示意图

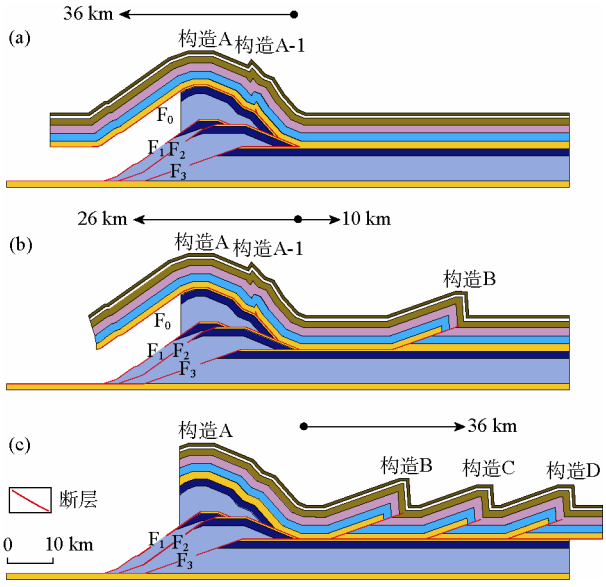


图 2 冲断系统内断层位移传递和消减的 3 种方式

成带展布，且构造变形具有明显的层次，如卷入变形的层位越来越新、构造变形的强度越来越弱、断层滑脱面所在层位越来越浅等，其中以天山南麓、塔西南帕米尔北缘和鄂尔多斯盆地西缘的冲断带最为典型。

1.1.1 Ⅰ$_1$型（库车型）前陆冲断带

Ⅰ$_1$型冲断构造在断层位移传递方向上通常成排

西南天山柯坪地区和鄂尔多斯盆地西缘的古生界沿着寒武系底部的滑脱面向盆地内部冲断，在地表形成多排逆冲岩席[35-36]；帕米尔北缘乌泊尔地区西南山前基底断裂下盘隐伏的波斯坦铁里克背斜由两个断层转折褶皱叠加而成，背斜下伏的台阶状逆断层沿古近系阿尔塔什组膏泥岩层向北滑脱，并切割上覆地层出露地表形成乌泊尔断层，断层上盘发育更新世背驮式盆地[37]；南天山中段库车河地区的新生代构造变形主要受 3 条台阶状逆断层控制（见图 3a），其位移量分别为 5.7 km、6.3 km 和 18.0 km[33]，活动时代由老到新，而位移量却逐渐增大，反映新生代以来构造变形存在一个加速的过程。但对于单条断层，由于褶皱的吸收作用以及分支断层的产生，位移量在向南传递的过程中逐渐递减，这是导致各构造带的变形强度由北向南逐渐减弱的主要原因。近年来的勘探证实，库车西段古近系库姆格列木组内膏泥岩在挤压作用下表现出复杂的堆积形态，一些学者据此提出了“盐构造”模型[38-40]，但地表和地下构造带在东西方向的线形延伸

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

及成排展布特征仍然揭示了南北方向的挤压和冲断在构造变形中的主导地位。

1.1.2 Ⅰ$_2$型（川西南型）前陆冲断带

Ⅰ$_2$型前陆冲断带主要发育在四川盆地西南龙门山中段—南段以及塔里木盆地西南部和田地区，以多

表 1　中国中西部前陆冲断带的运动学分类

类型	运动学机制	基本特征	典型冲断带
Ⅰ型前陆冲断带 Ⅰ$_1$型（库车型）	冲断带内的断层位移沿滑脱面全部传递至盆地内部，断层位移在断坡位置引发褶皱变形	冲断带宽度适中（>50 km），构造变形在位移传递方向具有明显的层次，成排成带特征明显	库车、帕米尔北缘乌泊尔和鄂尔多斯盆地西缘冲断带
Ⅰ型前陆冲断带 Ⅰ$_2$型（川西南型）		断层位移超远距离传递（>200 km），构造变形成排成带特征明显	四川盆地西南缘、塔里木盆地西南缘和田冲断带
Ⅰ型前陆冲断带 Ⅰ$_3$型（酒泉型）		古生界内部大规模水平逆掩推覆，地表构造窗和飞来峰发育，构造变形成排成带特征不明显	准噶尔盆地西北缘和酒泉盆地南缘冲断带
Ⅱ型前陆冲断带（准南型）	冲断带内的断层位移既向盆地传递，也向造山带方向消减，断层位移在断坡位置引发褶皱变形	冲断带宽度较Ⅰ型窄（<50 km），构造楔作用控制了地表背斜带排列方式，构造变形成排成带特征明显	准噶尔盆地南缘冲断带
Ⅲ型前陆冲断带（甫沙型）	冲断带内的断层位移全部沿着反冲断层向造山带方向消减	冲断带宽度适中（约 50 km），表现为典型的构造楔作用，地表构造变形微弱，成排成带特征不明显	塔里木盆地西南缘甫沙冲断带
复杂边界制约下的前陆冲断带（柴达木型）	冲断带内的断层位移传递受盆地形态和周缘边界限制，盆地同时发生侧向滑动	无稳定的前陆区和楔状沉积结构，主滑脱面位于上地壳 12～13 km 深度，构造变形成排成带特征明显	柴达木盆地西南缘和北缘冲断带

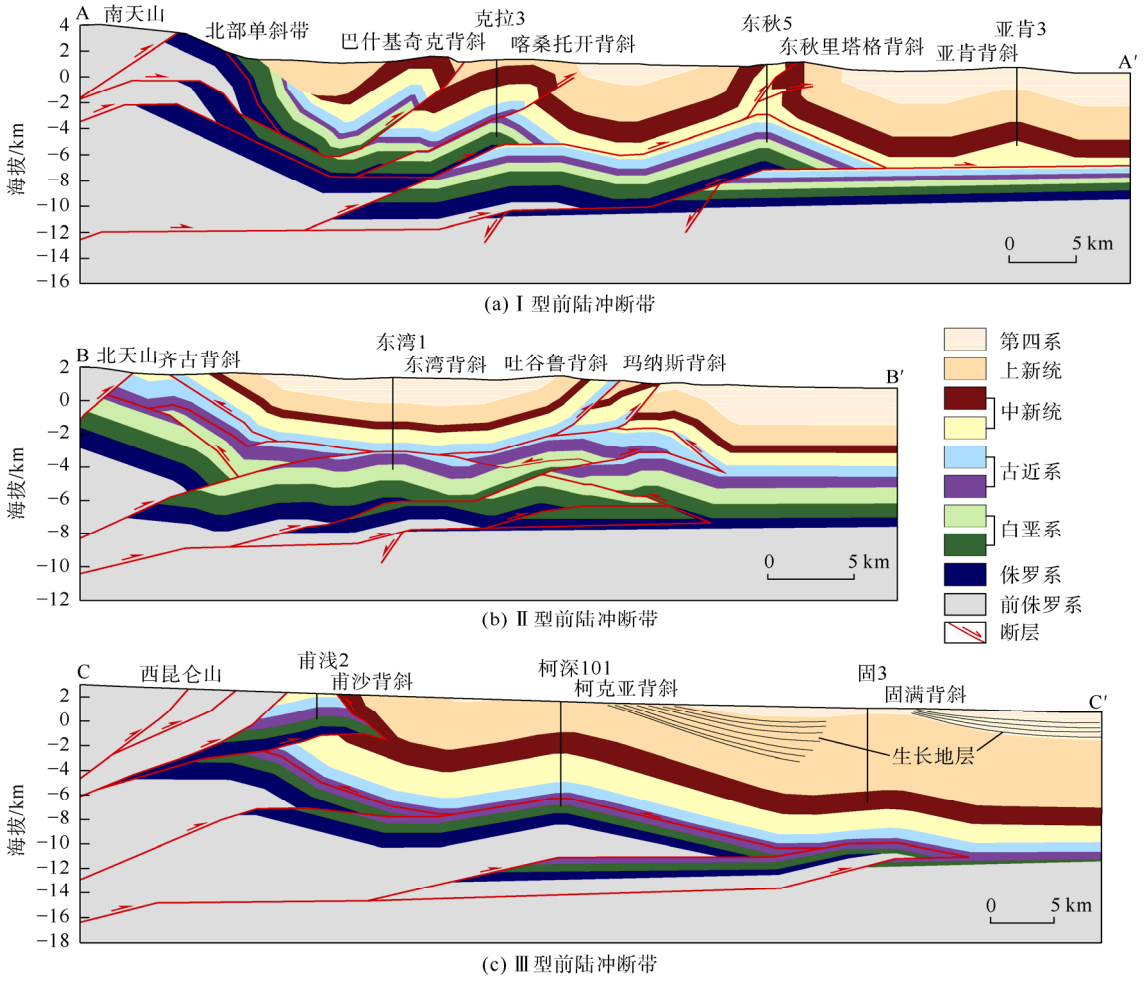


图 3　中国中西部前陆冲断带的运动学分类（剖面位置见图 1）

层次滑脱和断层位移超远距离传递为特点。川西前陆冲断带内多层次滑脱作用的动力来自于龙门山造山带，沿深部滑脱断层向东传递的位移量几乎横跨整个盆地，达到 200 km 以上（见图 4）[41]，直抵川东。2008 年汶川地震后，四川盆地内部的地震活动偏于盆地南侧的中、西部（如 2010 年 1 月 31 日 Ms 5.0 mb 遂宁地震），并表现出面状分布的特征，其发震机制可能就来源于深部滑脱断层的位移传递作用。四川盆地发育全

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

区分布的下三叠统嘉陵江组膏盐岩，中、东部发育厚层志留系泥岩、寒武系膏岩盐岩，上三叠统与上二叠统还发育含煤岩系，这些层系是主要的滑脱层位。川西前陆冲断带不但在沉积盖层中出现多层滑脱，而且

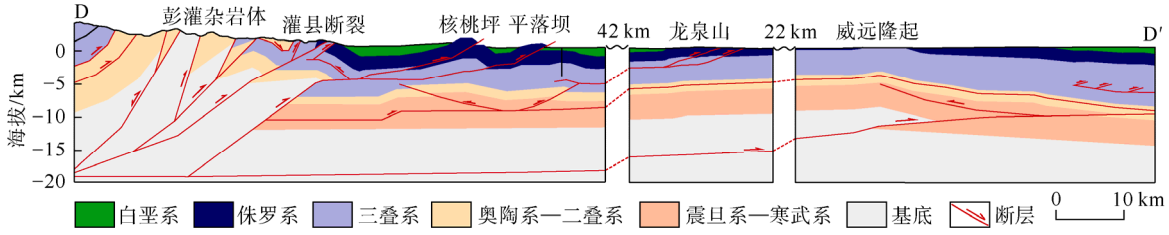


图 4 I_2型（川西南型）前陆冲断带（剖面位置见图 1）（据文献[41]和[43]修改）

在基底中也存在韧性剪切与拆离滑脱，根据区域地震资料解释出的深层滑脱层位于前震旦系基底，深度约（19±2）km[42]，沿上述滑脱层位向东传递的断层位移切割上覆地层，在盆地内部形成了核桃坪、平落坝、大兴场、三苏场、盐井沟和龙泉山等构造[43]。与川西前陆冲断带不同的是，塔里木盆地西南缘和田地区的冲断作用则表现为沿单条台阶状逆断层滑脱的特点，西昆仑山前逆掩推覆形成的和田南背斜宽度达 60 km，下伏台阶状逆断层的下部和上部滑脱面分别位于奥陶系和二叠系内部，断层位移量 23～35 km，这部分位移量沿着上部滑脱面一直传递至 200 km 以外的玛扎塔格断裂带[44]。

1.1.3 I_3型（酒泉型）前陆冲断带

I_3型前陆冲断带主要发育在准噶尔盆地西北缘和酒泉盆地南缘（见图 5），以古生界内部大规模的水平逆掩推覆为特征，在地表常出现覆盖在新地层之上的飞来峰，或局部老地层被剥蚀后露出新地层而形成的构造窗。

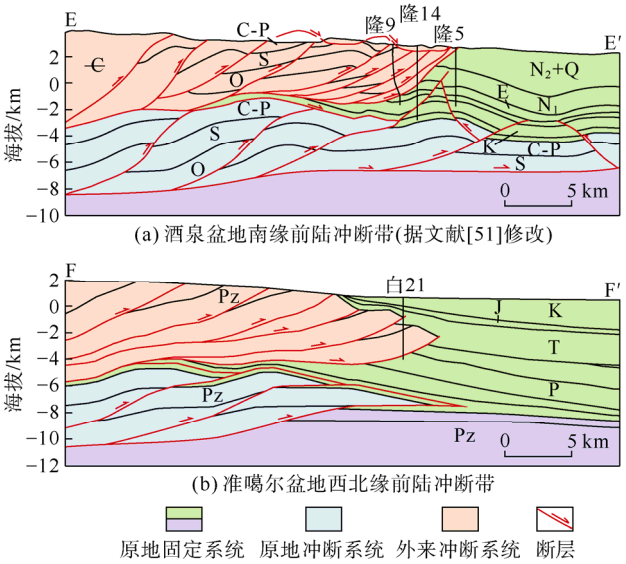


图 5 I_3型（酒泉型）前陆冲断带（剖面位置见图 1）

准噶尔盆地西北缘冲断带形成于三叠纪末期[45]，酒泉盆地南缘冲断带的形成时间则始于中新统胳塘沟组沉积晚期[46-47]，虽然二者的形成时间不同，但冲断带的结构和运动学机制相似。程晓敢将酒泉前陆冲断带西段的结构划分为原地冲断系统、近距离冲断系统和远距离冲断系统[46]，三者依次叠置，水平方向的逆掩推覆距离可达 10 km 以上，其中远距离冲断系统基本已被剥蚀殆尽，主要表现为地表中生界之上的干沟、草滩、青稞地和谢借子等奥陶系飞来峰构造。准噶尔盆地西北缘冲断带在纵向上可划分为上、下两个构造层，上构造层主要由克—乌断裂带构成，内部发育 4～5 排逆冲断层，呈叠瓦状，并归聚于下二叠统佳木河组底部的主滑脱断面中。下构造层则包络在下二叠统佳木河组底部的滑脱断面之下，表现为不同叠加形式的双重构造，双重构造内部的各断块由石炭系及其以下地层组成，拥有共同的底部滑脱面和顶部滑脱面。由于下二叠统佳木河组底部滑脱断面的形态与下伏双重构造的顶面形态具有一致性，因此推测上构造层在形成次序上要先于下构造层[45]。

1.2 II型前陆冲断带

II型前陆冲断带的运动学机制可用图 2b 模型表示，冲断带内既存在向盆地内部传递的位移，也存在沿反冲断层向造山带方向消减的位移，因而 II 型冲断带在盆地内部形成的构造变形较 I 型冲断带弱。沿反冲断层消减的位移是深部构造楔作用的结果，当反向传递的位移切割了上覆地层，在构造楔前翼将形成具有指示意义的背斜构造。在地表，此类背斜通常发育在单斜之上，可作为识别深部构造楔的直接依据[48]。

准噶尔盆地南缘是 II 型前陆冲断带发育的最典型地区（见图 3b）。准噶尔盆地南缘中—新生界内部发育了 3 排近东西延伸的背斜带，在第 2 排背斜带至北天山山前约 30 km 的距离内，中—新生界的抬升幅度超过 10 000 m，形成了规模宏大的单斜构造。在准噶尔

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

盆地南缘西段，单斜构造内可识别出生长地层，生长轴面南倾，生长地层厚度向南越过生长轴面后迅速变薄，这一特征与生长构造楔模型[16]是一致的。由于生长地层底界位于上新统独山子组（N_2d）底部，因此深部构造楔的活动时间始于上新世早期。在准噶尔盆地南缘东段，深部构造楔在向北扩展过程中，一部分位移量沿构造楔顶部的反冲断层向南消减并切割上覆地层，形成了第 1 排背斜带；而另一部分位移量沿中上侏罗统西山窑组（$J_{2-3}x$）煤层向北传递并在断坡位置引发褶皱变形，形成了第 2 排和第 3 排背斜带。因此，在总位移量保持稳定的前提下，这 3 排背斜带在走向上的此消彼长反映了断层位移在南、北方向上的转换[48]。

1.3 Ⅲ型前陆冲断带

Ⅲ型前陆冲断带的运动学机制可用图 2a 模型表示，冲断带内的断层位移全部沿着包络在深部构造楔顶部的反冲断面向造山带方向消减。由于没有断层位移向前传递，因此在深部构造楔的前侧通常没有构造变形发生。Ⅲ型冲断带内的地表背斜通常变形宽缓，断裂不发育，这一特征与Ⅰ型和Ⅱ型冲断带内强烈的地表构造变形形成鲜明对比。

Ⅲ型前陆冲断带主要发育在塔里木盆地西南缘甫沙和柴达木盆地北缘东段德令哈地区。塔里木盆地西南缘甫沙冲断带的南侧是西昆仑山前数条陡倾的基底断裂，将前寒武系变质岩和古生界推覆至地表（见图 3c），推覆体下伏的构造楔由数个古生界—中生界的断层转折褶皱叠置而成，其顶部的被动顶板反冲断层位于古近系底部膏泥岩层，构成深部构造楔的包络面[37]，包络面之上的新生界整体北倾，褶皱变形宽缓。甫沙冲断带内 3 排背斜带前翼生长地层的底界由南向北逐渐抬升，因此各排背斜的形成时间由南向北逐渐变新，这个特征揭示了深部构造楔的“前列式”扩展作用[37,49]。在柴达木盆地北缘东段德令哈地区，祁连山南缘宗务隆山冲断带前缘的欧龙布鲁克凸起呈南缓北陡的特征，反映了深部断层从南向北的冲断作用，这些断层吸收了宗务隆山冲断带向盆地内部传递的所有位移，从而使欧龙布鲁克山以南三湖凹陷内的构造变形微弱[50]。

1.4 复杂边界制约下的前陆冲断带

柴达木盆地的新生代沉积与典型的前陆盆地不同，前陆盆地的沉积中心总是处于山前逆冲断层前缘，向前陆（盆地方向）减薄，呈不对称的楔状，而柴达木盆地新生代以来的沉积中心基本固定在盆地的中心部位，这一特征与美国落基山中部发育在大型基底卷入断层上盘的一些晚白垩世—古近纪的 Laramide 盆地相似，Dickinson 等将这类盆地称为轴心盆地（axial basins）[51]。但柴达木盆地之所以没有发育前陆盆地特有的楔状沉积结构，是因为受其独特的边界条件限制，如阿尔金山脉的阻挡、盆地纵深狭窄以至没有形成稳定的前陆区。新生代阿尔金断裂的形成是青藏高原向北推挤及柴达木盆地向北东方向侧滑的结果，在地理上，阿尔金断裂是青藏高原和柴达木盆地的西北边界，从这个角度而言，来自南侧东昆仑—祈漫塔格造山带的挤压作用对柴达木盆地的影响是主动的，而阿尔金断裂对柴达木盆地的影响则是被动的，因此本文倾向于把阿尔金断裂作为一个边界条件而不是作为一条断裂去考虑。地震构造解释成果表明，上新世以来柴达木盆地的构造缩短主要集中在柴西南的祈漫塔格山至柴北缘的赛什腾山—绿梁山之间，而柴东的三湖地区几乎没有向北的构造缩短[50]。根据国家地震台网中心 1970 年 1 月 1 日—2011 年 1 月 1 日对柴达木盆地震级大于 3 mb 的 600 余个地震事件的统计，柴西南地区震源深度主要集中在 12～13 km，这个现象揭示柴西南地区的盆地基底内部可能存在一条活动的滑脱断面。这条滑脱断面在地震剖面上对应于 6～7 s 的深度，向北逐级抬高，使得上覆新生界盖层内的构造变形如Ⅰ型前陆冲断带一样具有明显的层次，可划分为山前断阶带、英雄岭双重构造带和柴西北叠瓦构造带 3 个部分，其前锋可能已延伸至柴北缘地区。因此，柴北缘地区的冷湖和鄂博梁浅层（地表）背斜带属于柴西南冲断系统，而深层背斜带则属柴北缘冲断系统（见图 6），二者互相叠置，分别表现为“仰冲”和“俯冲”的特征。

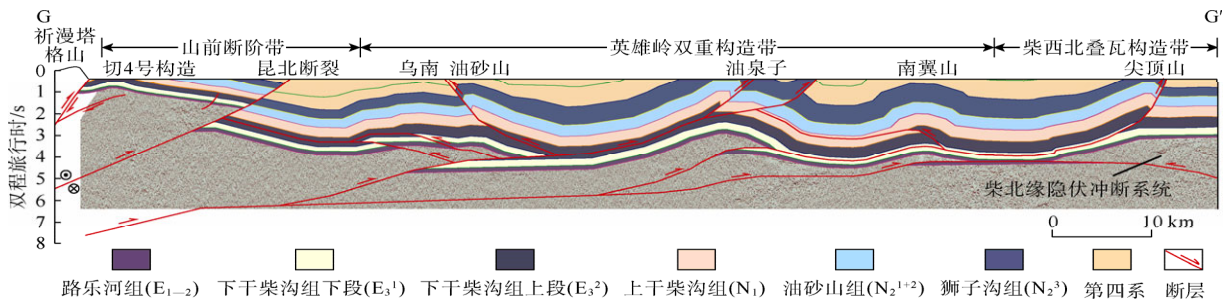


图 6　柴西南新生代前陆冲断系统（剖面位置见图 1）

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2 中西部前陆冲断带复杂构造建模技术

复杂构造解析中的建模技术主要用于确定构造的变形机制、变形时间、变形过程和变形量[23]。但在有限的资料约束下，构造建模的结果往往存在多解性，因此寻求建立模型内部的约束机制一直是构造建模理论与技术研究的主要内容。目前以反映断层形态、褶皱形态与断层位移之间定量关系的断层相关褶皱分析技术最为成熟，特别是针对含油气盆地内部低温、非变质条件下的脆性构造变形以及与塑性体流动有关的滑脱褶皱变形等，都已形成了较为成熟的理论和方法[16]。但断层相关褶皱模型的建立主要以构造变形的几何学参数为依据，如面积、厚度、长度、轴面和等倾角区等，而没有涉及卷入变形地层的力学结构。近年来逐渐认识到，构造变形的样式和机制也受到卷入变形地层的岩石力学结构特别是相邻地层之间的强度对比控制，因此基于地层岩石力学性质的构造变形方式与生长过程的三维空间数值模拟已成为复杂构造建模技术研究的一个重要领域，并正在含油气构造裂缝预测中得以应用[27-28]，本文以准噶尔盆地南缘霍尔果斯背斜为例简要说明。

霍尔果斯背斜体模型是在 Gocad 平台上综合地表构造和三维地震工区解释数据建立的（见图 7），共包含 12 条断层和 9 个层位。为使该模型更接近真实的地质体，选取深层背斜体模型，根据地质露头和钻井岩心资料在体模型的各套地层中设置剪切模量、拉梅常数和密度（见表 2），其中剪切模量用以衡量地层发生弹性变形的难易程度，拉梅常数用以反映地层（储集层）的物性变化。体模型被赋予这些参数后可称为介质模型，将用于三维构造恢复（见图 8）。恢复矢量的计算采用动态松弛和有限元方法，恢复前后的实体在遵循最小应变原则的前提下保持体积守衡[52-54]。恢复过程中同时计算实体模型内部每个四面体单元的形状和体积变化，这个变化值称为恢复应变[54]，由 3 个分量组成：最大恢复主应变、最小恢复主应变和中间恢复主应变。显然恢复应变与应变的性质是相反的，恢复过程中的拉张应变区对应变形过程中的挤压应变区，恢复过程中的挤压应变区对应变形过程中的拉张应变区。

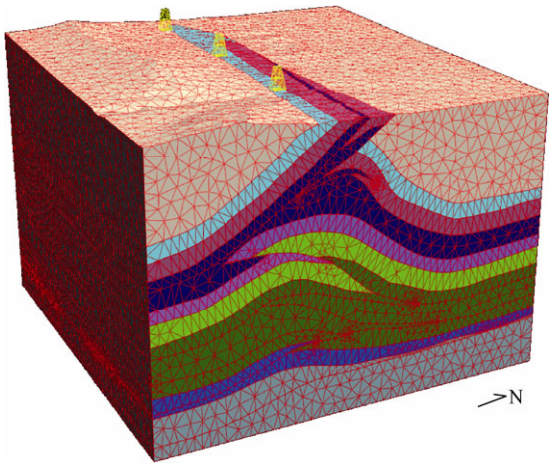
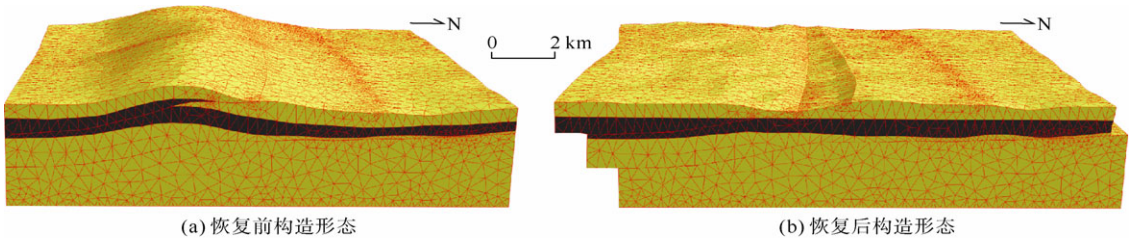


图 7 霍尔果斯背斜体模型

表 2 准噶尔盆地南缘部分地层的岩石力学参数

地层	剪切模量/GPa	拉梅常数/GPa	密度/（kg · m^{-3}）
$E_{1-2}z$	6.92	10.38	2 600
K_2d	7.58	13.47	2 700
K_1tg	8.85	13.27	2 700
$J_{2-3}x$	9.77	12.43	2 650
基底	96.15	144.23	2 800

注：$E_{1-2}z$—古新统—始新统紫泥泉子组；K_2d—上白垩统东沟组；K_1tg—下白垩统吐谷鲁群；$J_{2-3}x$—中—上侏罗统西山窑组



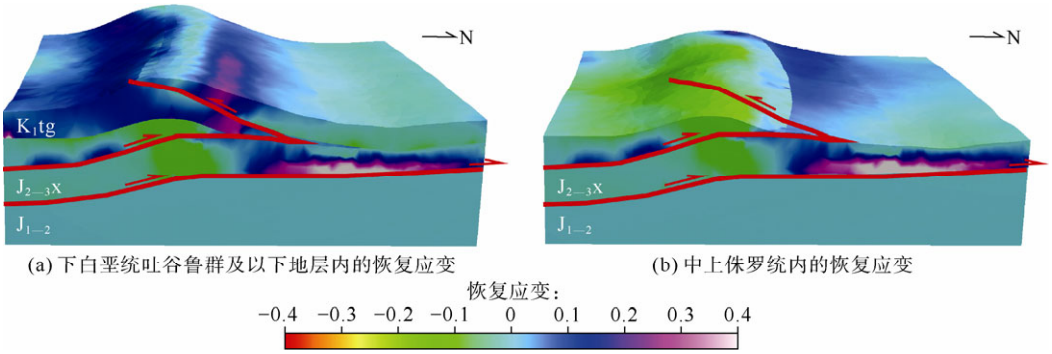
(a) 恢复前构造形态 (b) 恢复后构造形态

图 8 霍尔果斯深层中生界构造的三维恢复试验

霍尔果斯深层背斜脊部经历了微弱的拉张变形，而翼部则是挤压应变的发生位置，最大挤压应变强度发生在背斜前翼（较陡的一翼）的中部。但在深部前冲断层和后冲断层夹持的楔形体内部，虽然下白垩统吐谷鲁群（K_1tg）和中上侏罗统（J_{2-3}）的褶皱形态一致，但这两套地层的恢复应变却表现出截然不同的分布，如下白垩统吐谷鲁群（K_1tg）的两翼都为挤压应变区（见图 9a），而中上侏罗统的前翼为挤压应变区，后翼主要表现为拉张应变（见图 9b）。这种现象说明，即使在同一断块内部，虽然各地层经历了相同的运动学过程，但仍有可能表现为不同的应变分布。再如表 2 中基底的剪切模量和拉梅常数比上覆地层大约 10 倍，

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

文章编号：1000-0747(2013)01-0066-13



K_1tg—下白垩统吐谷鲁群；$J_{2—3}$x—中—上侏罗统西山窑组；$J_{1—2}$—中下侏罗统

图 9 霍尔果斯深层中生界构造内的恢复应变

恢复结果显示基底内没有任何应变发生，因此构造变形中的应变分布除与褶皱形态相关外，主要受相邻地层之间的强度对比控制，而与其所经历的运动学过程并没有显著的对应关系。恢复应变的计算结果可用于含油气构造裂缝的识别，如恢复应变椭球的长轴（即应变椭球的短轴）对应压性裂缝，恢复应变椭球的短轴（即应变椭球的长轴）对应张性裂缝，而恢复应变数值的分布方式则可用于构造裂缝发育强度和密度评估。目前该方法已被用于中西部一些前陆盆地致密砂岩储集层构造裂缝的预测，在准噶尔盆地西北缘地区，虽然乌尔禾—夏子街构造带表现为由北东向南西倾伏，但下二叠统风城组（P_1f）恢复应变计算结果却显示，低部位的乌尔禾构造内的张应变强度要远大于高部位的夏子街构造（见图 10a），钻探结果也最终证实乌尔禾构造比夏子街构造发育更有利的构造裂缝并有更大规模的油气发现。在四川盆地中部某地区，上寒武统—中上二叠统总体表现为向西缓倾的斜坡，断裂不发育，但通过恢复应变计算，在斜坡低部位发现了两条斜列的强挤压应变区，应变值要明显高于斜坡上倾部位的应变值，这一特征揭示斜坡低部位可能是微断裂带和构造裂缝发育的有利位置（见图 10b）[23]。

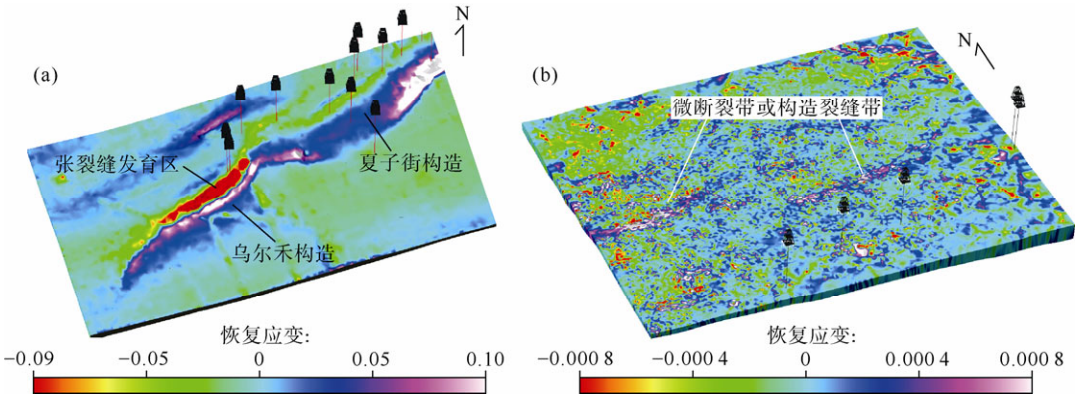


图 10 准噶尔盆地西北缘乌尔禾—夏子街构造带下二叠统风城组（a）和四川盆地中部某地区上寒武统—中上二叠统（b）恢复应变计算结果

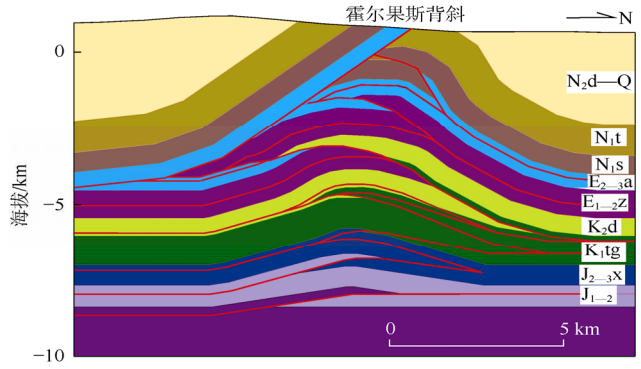
3 复杂构造解析与建模揭示的一些重要勘探领域

3.1 准噶尔盆地南缘深层叠加构造楔形体

准噶尔盆地南缘的油气勘探从 20 世纪 30 年代就已开始，目前已在所有的地面构造上开展了钻探，先后发现了独山子、齐古、呼图壁、卡因迪克和玛纳斯等油气田以及西湖、霍尔果斯、吐谷鲁背斜等含油气构造。但准噶尔盆地南缘新生界构造变形复杂，构造圈闭的准确识别和精细落实一直是个难题，如在对第 2 排背斜带的勘探中都曾出现预探井获得较好油气发现，而两侧评价井失利的问题[55]。近年来，随着三维地震勘探和宽线地震技术的应用，第 2 排背斜带深部两个重要的特殊构造现象被揭示出来，一是深层背斜两翼由深至浅逐渐变陡，二是构造高点由深至浅向北偏移。这两个现象可能由深部的构造楔形体叠加引

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

起[26,48]，且在不同部位表现为不同的叠加方式，如在霍尔果斯背斜主体部位表现为完全叠加（见图 11），而在两侧相邻背斜带的交会部位，则由完全叠加转化为部分叠加，前者导致构造高点由浅至深发生偏移，而



N_2d—Q—上新统独山子组－第四系；N_1t—中新统塔西河组；N_1s—中新统沙湾组；$E_{2—3}a$—始新统－渐新统安集海河组；$E_{1—2}z$—古新统－始新统紫泥泉子组；K_2d—上白垩统东沟组；K_1tg—下白垩统吐谷鲁群；$J_{2—3}x$—中－上侏罗统西山窑组；$J_{1—2}$—中－下侏罗统

图 11 霍尔果斯背斜构造解释剖面

后者则导致构造高点发生分异（见图 3b）。这些构造楔形体一般规模不大，若按 Elliott 的“弓箭法则”（逆断层的最大位移量约等于其延伸长度的 7%～12%）[56]计算，一个最大位移为 500 m 的楔型体，其延伸长度只有 4.0～7.5 km，因此相对于一个延伸数十千米的背斜而言，其内部可能发育多个这样的楔形体，呈“鱼鳞”状重复叠置，从而导致背斜带内部油气水系统复杂化。准噶尔盆地南缘第 2 排背斜带内部的叠加构造楔形体模式对中国中西部其他复杂构造地区的背斜勘探具有一定借鉴意义。传统的背斜勘探理论是以圈闭内部结构完整、油气水系统单一的假设为基础的，但背斜内部的构造楔形体有可能具有独立的油气水系统，从而造成同一背斜的不同部位出现完全不同的油气水特征[26]。此种小尺度的叠加楔形体的有效识别须立足于高质量的三维地震资料。若埋藏较深，储集层物性可能变差，则可应用前述三维构造建模技术计算恢复应变，以精确刻画目标楔形体在三维空间的延伸及内部裂缝发育状态。霍尔果斯深层下白垩统吐谷鲁群（K_1tg）背斜的顶面埋深达 5 000 m，通过恢复应变计算（见图 9），背斜高部位为拉张变形区，应变值 0.05～0.10（即 5%～10%的变形量，下同），两翼为挤压变形区，最大应变值达 0.4，而下伏中－上侏罗统喀拉扎组（J_3k）和齐古组（J_3q）背斜核部和南翼均表现为张性变形区，最大应变值超过 0.2，远大于上覆白垩系东沟组背斜核部的拉张应变值 0.05～0.10，中—上侏罗统构造内部如此大的拉张变形强度极有可能产生丰富的张性裂缝，从而改善储集层物性。因此，准噶尔盆地南缘的油气勘探应关注深层的中生界构造。

3.2 川西北倒转推覆体下的晚古生代被动陆缘层序

在对川西北天井山冲断带实施钻探前，曾一度认为地表的泥盆系—二叠系冲断岩席下掩伏着下三叠统飞仙关组－上三叠统须家河组的“堆垛式”背斜，但 2007 年天井 1 井钻探结果却反映深部结构远比钻探前解释的复杂。天井 1 井在 978 m 深度就进入寒武系，钻揭（视）厚度 2 732 m，然后再次进入泥盆系—二叠系，期间多次出现地层重复。倾角测井显示地层基本为北西倾向，且从寒武系内部 1 700 m 开始倾角由 70°逐渐降为 10°～20°，反映其为一个倒转并逐渐往深部收敛的推覆体，但直至完钻深度 4 600 m 仍未钻穿推覆体。根据现有地震资料，从盆地向此推覆体下引地震层位可控制住 6 000 m 以下由寒武系—下二叠统组成的断层转折褶皱，在此褶皱之上至完钻层位上二叠统长兴组之间约 1 500 m 的地层里，推测可能存在另一个由相同地层构成的断层转折褶皱，其下伏断层在下三叠统嘉陵江组膏盐岩滑脱，并与天井 1 井已钻揭到的两条断层相接构成向盆地内部扩展的楔形体（见图 12）。

天井山倒转推覆体下的泥盆系－下二叠统是经震旦纪－早古生代扬子克拉通北部裂陷作用后，于勉－略洋盆南侧沉积的被动大陆边缘层序[57-58]，以主体发

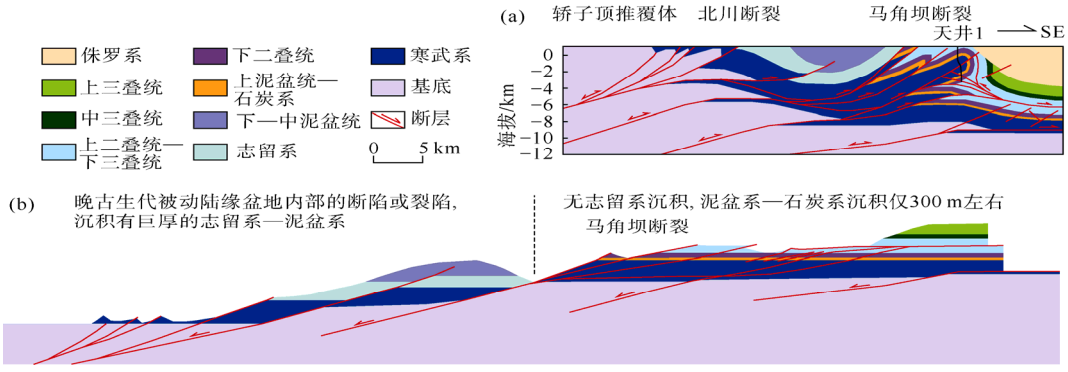


图 12 四川盆地西北缘枫顺场至天井山区域构造解释剖面及其复原

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

育碳酸盐岩台地为特征[59]，近年来普光、龙岗、罗家寨等一系列大气田的发现已揭示这套层序是四川盆地海相油气勘探取得战略突破的重要领域。天井 1 井未钻遇志留系，钻揭到的泥盆系—石炭系厚度只有 300 m 左右，而其北侧马角坝断层上盘地表则出露巨厚的志留系—泥盆系，这个特征也说明马角坝断层在晚古生代具有正断层性质。但晚古生代—中三叠世的大陆边缘盆地历经晚三叠世—早白垩世前陆冲断活动与前陆盆地的叠加[57-58]，原始沉积相带面貌不全，构造、沉积单元已发生变形、变位，如果将马角坝断层上盘的志留系—泥盆系复位，可以计算出其原始沉积位置大概在马角坝断层西北 38 km 处（见图 12）。因此，尚需系统开展晚三叠世以来前陆冲断构造的“筛分”工作，以充分揭示该陆缘盆地的保存状态、残余结构及其所控制的油气地质作用环境。

3.3 库车中段和东段的煤下构造

克拉 2 构造受南北两条断层的夹持（见图 13），一般认为，南侧断层 F_0 控制了克拉 2 构造的形成，北侧断层 F_1 则是南侧断层 F_0 的派生产物。但需注意的是，这条“派生断层”的下盘存在着幅度超过 300 ms 的背斜构造，且断层上盘和下盘截切线的长度相差悬殊，若按“派生产物”复原北侧断层 F_1，那么复原过程是无法实现的（见图 13a）。这个问题的正解只能有两个，一是克拉 2 构造可能是斜向逆冲的产物，不能按剖面复原的方法验证其形成过程；二是北侧断层 F_1 首先向北逆冲形成克拉 2 构造，然后被后期更强烈的南侧断层 F_0 切割，北侧断层 F_1 下盘的 300 ms 背斜则受更深部的向南逆冲的台阶状断层 F_2 控制，这个模型也可合理解释克拉 2 构造下盘巨厚的膏盐岩堆积现象，即后期更强烈的南侧断层 F_0 造成了克拉 2 构造愈千米垂向抬升，这个过程可能产生“泵吸”作用使得周围塑性岩层向断裂下盘流入（见图 13b）。修正后的克拉苏深部构造解释方案包括盐下和煤下两套冲断系统（见图 14）[24]，其中盐下冲断系统受侏罗系煤层内部的滑脱断层控制，煤下冲断系统则包络在侏罗系煤层之下，表现为不同叠加形式的双重构造。侏罗系煤下构造自西向东具有抬升的趋势，在克拉苏中段大致与南侧的克深背斜带深度相当，向东至克孜勒努尔地区抬升最高，由于更接近油源层，且保存完整，因此是一个值得探索的新领域。

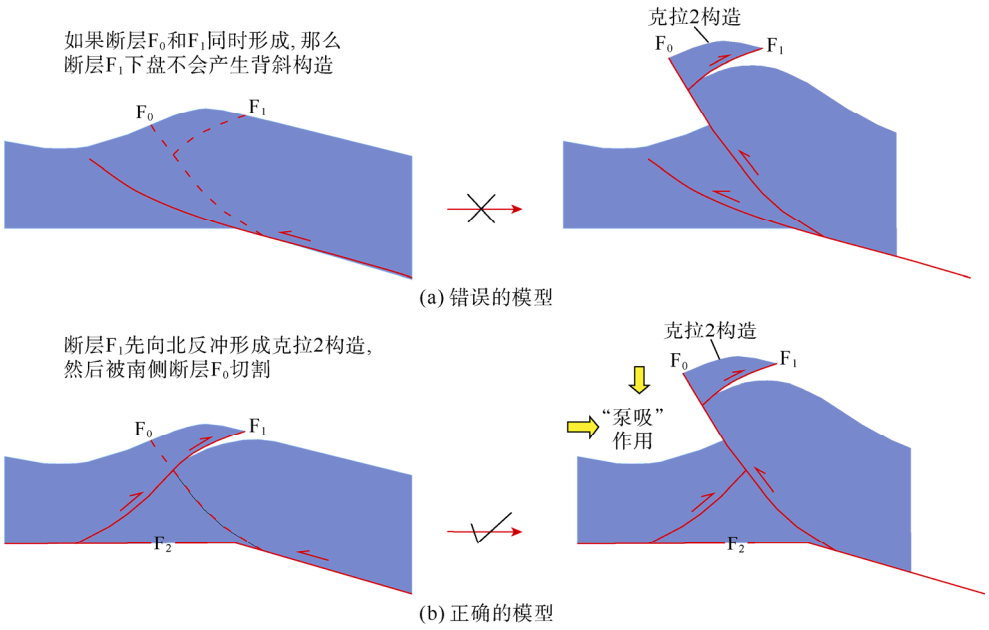


图 13　克拉 2 构造的两种运动学模式辨析

3.4 准噶尔盆地西北缘下盘掩伏构造

前文已述及，准噶尔盆地西北缘克—百地区冲断带的结构与酒泉盆地南缘窟窿山冲断带极为相似（见图 5），均以古生界内部大规模的水平逆掩推覆为特征。准噶尔盆地西北缘克—百断裂带的下盘掩伏构造有两种类型：①背斜构造，位于下二叠统佳木河组（P_1j）底部的滑脱断面之下，属原地冲断系统，内部各断块均表现为断层转折褶皱，相互叠加构成双重构造。②“帽檐”构造，深部双重构造在扩展过程中造成二叠系的抬升并被克—百断裂带切割，从而形成倾向南东的单斜构造，形似“帽檐”[45]，若克—百断裂带形成有效的遮挡，其下盘“帽檐”部位可构成断块型圈闭。

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

这两类构造被遮盖在外来冲断系统之下，保存完整，又接近早期沉积的油源层，油气充注条件优越，有可

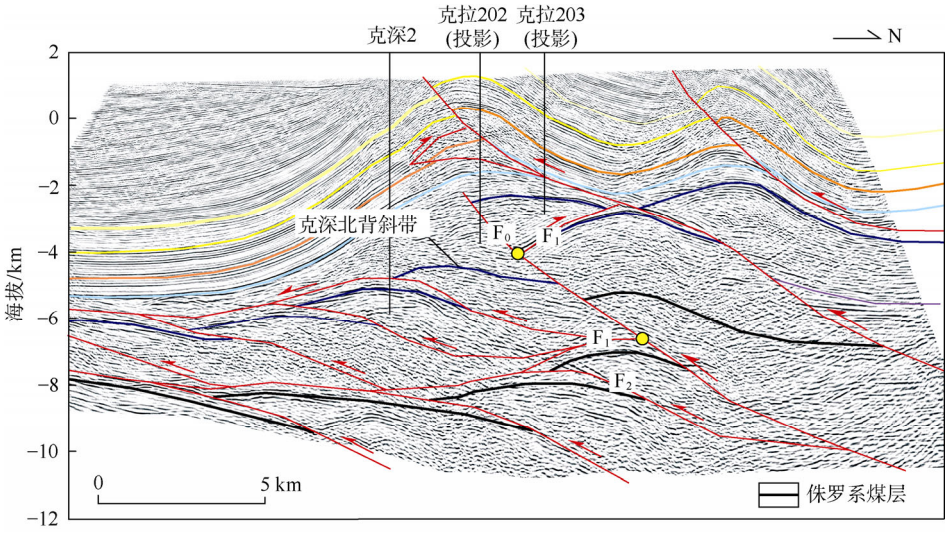


图 14 库车克拉苏构造带解释剖面

能成为理想的聚油构造。但由于下盘掩伏构造的复杂性，这一领域的勘探往往都经历了漫长曲折的历程，如落基山前陆区寒武系推覆体下的大规模天然气田是在勘探 30 年后才发现的，中国酒泉盆地南缘窟窿山志留系推覆体之下亿吨级青西油田的发现也经历了半个多世纪的勘探。这两个成功勘探实例对于准噶尔盆地西北缘下盘掩伏构造的勘探无疑具有启发意义。

4 结论与展望

多层次拆离滑脱是中国中西部前陆冲断带形成的重要动力学机制，近年来研究已证实，天山、祁连山、西昆仑、龙门山、大巴山等前缘发育多套滑脱层，如四川盆地全区分布的下三叠统嘉陵江组膏盐岩、中东部分布的厚层志留系泥岩和寒武系膏盐岩，塔里木盆地库车坳陷古新统—始新统库姆格列木组膏泥岩和中下侏罗统阳霞组—阿合组煤层，准噶尔盆地南缘始新统—渐新统安集海河组泥岩和中上侏罗统西山窑组煤层，以及柴达木盆地渐新统下干柴沟组上段内的泥岩等。深部地球物理资料也揭示这些盆地基底内部存在韧性剪切与拆离滑脱现象，如柴达木盆地中下地壳内的“低速、高导层”。对于中西部前陆冲断带普遍存在的这种动力学机制，尚需在以下 4 个方面开展深入研究：①对滑脱层的结构、形态、分布、岩石物理及力学参数的准确厘定与系统测试，为多层次滑脱构造模型提供中、浅层的直接约束；②应用构造楔与临界锥顶角理论，探讨滑脱系统的成因机制；③借助精细的构造变形定年技术（$^{40}Ar/^{39}Ar$ 方法和 SHRIMP 方法），分析不同变形阶段滑脱系统的构造叠加、转换与相互作用机制；④通过构造物理模拟与数值模拟手段，建立多重滑脱系统的几何学、运动学与动力学模型。

对于多重滑脱系统的油气勘探意义，建议从以下 3 个方面开展工作：①多重滑脱构造系统对油气成藏要素与油气成藏作用的制约，包括单个滑脱构造系统在形成、演化和多阶段叠加过程中烃源层、储集层、盖层与上覆岩层的时空变化与配置关系，以及对成岩、生烃、排烃、运移聚集、成藏保存与调整改造的影响；②研究多重滑脱系统制约下的多含油气层系和油气勘探新领域，应用油气成藏体系和油气成藏组合的分析方法，从滑脱系统与叠加系统的角度剖析新的含油气层系和区带；③研究盆地周缘造山带向盆地内部的逆掩推覆距离，分析被掩覆的前前陆期地层结构，以石油地质综合研究为主要手段，指出隐伏滑脱系统蕴含的油气勘探前景。

致谢：研究工作中与中国石油勘探开发研究院李本亮高级工程师、哈佛大学 John Shaw 教授、北京大学郭召杰教授进行了有益的讨论，程丰提供了柴西南地区震源深度统计结果，中国石油勘探开发研究院侯连华、李伟和杨庚博士提供了准噶尔盆地西北缘和四川盆地中部的层位解释数据，在此谨致谢意。

参考文献：

[1] 贾承造，何登发，雷振宇，等. 前陆冲断带油气勘探[M]. 北京：石油工业出版社, 2000.

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Jia Chengzao, He Dengfa, Lei Zhengyu, et al. Oil and gas exploration in foreland thrust belt[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000.

[2] Hubbert M K, Rubey W W. Role of fluid pressure in mechanics of overthrust faulting[J]. Geological Society of America Bulletin, 1959, 70: 115-166.

[3] Davis D, Suppe J, Dahlen F A. Mechanics of fold-and-thrust belts and accretionary wedges[J]. Journal of Geophysical Research, 1983, 88(B2): 1153-1172.

[4] Dahlen F A, Suppe J, Davis D. Mechanics of fold-and-thrust belts and accretionary wedges: Cohesive Coulomb theory[J]. Journal of Geophysical Research, 1984, 89(B12): 10087-10101.

[5] Dahlen F A. Noncohesive critical Coulomb wedges: An exact solution[J]. Journal of Geophysical Research, 1984, 89(B12): 10125-10133.

[6] Dahlen F A. Critical taper model of fold-and-thrust belts and accretionary wedges[J]. Annual Reviews of Earth and Planetary Science, 1990, 18: 55-99.

[7] Suppe J. Absolute fault and crustal strength from wedge tapers[J]. Geology, 2007, 35(12): 1127-1130.

[8] Suppe J. Geometry and kinematics of fault-bend folding[J]. American Journal of Science, 1983, 283: 684-721.

[9] Suppe J, Medwedeff D. Geometry and kinematics of fault-propagation folding[J]. Eclogae Geologicae Helvetiae, 1990, 83(3): 409-454.

[10] Poblet J, McClay K R. Geometry and kinematic of single-layer detachment folds[J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1996, 80: 1085-1109.

[11] Erslev E A. Trishear fault-propagation folding[J]. Geology, 1991, 19(6): 617-620.

[12] Suppe J, Connors C, Zhang Y. Shear fault-bend folding[C]//McKlay K R. Thrust tectonics and hydrocarbon systems: AAPG Memoir 82. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2004: 303-323.

[13] Nar W, Suppe J. Kinematics of basement-involved compressive structures[J]. American Journal of Science, 2001, 294: 802-860.

[14] Mitra S, Mount V S. Foreland basement-involved structures[J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1998, 82: 70-109.

[15] Shaw J H, Suppe J. Earthquake hazards of active blind-thrust faults under the central Los Angeles Basin, California[J]. Journal of Geophysical Research, 1996, 101: 8623-8642.

[16] Shaw J H, Connors C, Suppe J. Seismic interpretation of contractional fault-related folds: An AAPG seismic atlas[M]. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2005.

[17] Shaw J H, Bilotte F, Brennan P A. Patterns of imbricate thrusting[J]. Geological Society of America Bulletin, 1999, 111(7): 1140-1154.

[18] Mitra S. Duplex structures and imbricate thrust systems: Geometry, structural position, and hydrocarbon potential[J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1986, 70(9): 1087-1112.

[19] 管树巍，汪新，杨树锋，等．位移转换的两种概念模型与实例[J]. 中国科学: D 辑, 2004, 34(9): 807-817.
Guan Shuwei, Wang Xin, Yang Shufeng, et al. Two concept models of displacement transfer and examples[J]. Science in China: Ser. D, 2004, 34(9): 807-817.

[20] Medwedeff D A, Suppe J. Multibend fault-bend folding[J]. Journal of Structural Geology, 1997, 19(3/4): 279-292.

[21] Suppe J, Chou G T, Hook S C. Rates of folding and faulting determined from growth strata[C]//McKlay K R. Thrust tectonics. New York: Chapman Hall, 1992.

[22] Suppe J, Sàbat F, Muñoz J A, et al. Bed-by-bed fold growth by kink-band migration: Sant Llorenç de Morunys, eastern Pyrenees[J]. Journal of Structural Geology, 1997, 19: 443-461.

[23] 管树巍，何登发．复杂构造建模的理论与技术架构[J]. 石油学报, 2011, 32(6): 991-1000.
Guan Shuwei, He Dengfa. Theoretical and technical framework of complex structural modeling[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(6): 991-1000.

[24] 管树巍，陈竹新，李本亮，等．再论库车克拉苏深部构造的性质与解释模型[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(5): 531-536.
Guan Shuwei, Chen Zhuxin, Li Benliang, et al. Discussions on the character and interpretation model of Kelasu deep structures in the Kuqa area[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(5): 531-536.

[25] 管树巍，张朝军，何登发，等．前陆冲断带复杂构造解析与建模: 以准噶尔盆地南缘第一排背斜带为例[J]. 地质学报, 2006, 80(8): 1131-1140.
Guan Shuwei, Zhang Chaojun, He Dengfa, et al. Complex structural analysis and modeling: The first row of anticlinal belt on the southern margin of the Junggar Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(8): 1131-1140.

[26] 管树巍，陈竹新，方世虎．准噶尔盆地南缘油气勘探的三个潜在领域: 来自构造模型的论证[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(1): 37-44.
Guan Shuwei, Chen Zhuxin, Fang Shihu. Three potential exploration areas of Southern Junggar Basin discussed by structural modeling[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(1): 37-44.

[27] 管树巍，Plesch A，李本亮，等．基于地层力学结构的三维构造恢复及其地质意义[J]. 地学前缘, 2010, 17(4): 140-150.
Guan Shuwei, Plesch A, Li Benliang, et al. Volumetric structural restorations based on mechanical constraints and its geological significance[J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(4): 140-150.

[28] Plesch A, Shaw J H, Kronman D. Mechanics of low-relief detachment folding in the Bajiaochang field, Sichuan Basin, China[J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 2007, 91(11): 1559-1575.

[29] Guzofski C A, Mueller J P, Shaw J H, et al. Insights into the mechanisms of fault-related folding provided by volumetric structural restorations using spatially varying mechanical constraints[J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 2009, 93(4): 479-502.

[30] 冯建伟，戴俊生，鄢继华，等．准噶尔盆地乌夏前陆冲断带构造活动-沉积响应[J]. 沉积学报, 2009, 27(3): 494-502.
Feng Jianwei, Dai Junsheng, Yan Jihua, et al. Sedimentary response to Permian structural movements in Wuxia foreland thrust belt of Junggar Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(3): 494-502.

[31] 许志琴，李海兵，杨经绥．造山的高原: 青藏高原巨型造山拼贴体和造山类型[J]. 地学前缘, 2006, 13(4): 1-17.
Xu Zhiqin, Li Haibing, Yang Jingsui. An orogenic plateau: The orogenic collage and orogenic types of the Qinghai-Tibet plateau[J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(4): 1-17.

[32] Yin An, Dang Yuqi, Zhang Min, et al. Cenozoic tectonic evolution of the Qaidam basin and its surrounding regions(Part 3): Structural geology, sedimentation, and regional tectonic reconstruction[J]. Geological Society of America Bulletin, 2008, 120(7/8): 847-876.

[33] 管树巍，李本亮，何登发，等．晚新生代以来天山南、北麓冲断作用的定量分析[J]. 地质学报, 2007, 81(6): 725-744.
Guan Shuwei, Li Benliang, He Dengfa, et al. Late Cenozoic active fold-and-thrust belts in the Southern and Northern Flanks of Tianshan[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(6): 725-744.

[34] 赵政璋，杜金虎，邹才能，等．大油气区地质勘探理论及意义[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(5): 513-522.
Zhao Zhengzhang, Du Jinhu, Zou Caineng, et al. Geological exploration theory for large oil and gas provinces and its significance[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(5): 513-522.

[35] 杨晓平，冉勇康，程建武，等．柯坪推覆构造中的几个新生褶皱带阶地变形测量与地壳缩短[J]. 中国科学: D 辑, 2006, 36(10): 905-913.
Yang Xiaoping, Ran Yongkang, Cheng Jianwu, et al. Measurement of terrace deformation and crustal shortening of some renascent fold

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

zones within Kalpin nappe structure[J]. Science in China: Ser. D, 2006, 36(10): 905-913.

[36] 罗群. 鄂尔多斯盆地西缘马家滩地区冲断带断裂特征及其控藏模式[J]. 地球学报, 2008, 29(5): 619-627.
Luo Qun. Characteristics of faults in Majiatan area of west Ordos Basin and their petroleum reservoir controlling model[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2008, 29(5): 619-627.

[37] 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]. 地球科学, 2007, 42(4): 722-739.
Guan Shuwei, Li Benliang, He Dengfa, et al. Geometrical methods of complex structural analysis and their application[J]. Chinese Journal of Geology, 2007, 42(4): 722-739.

[38] 汪新, 王招明, 谢会文, 等. 塔里木库车坳陷新生代盐构造解析及其变形模拟[J]. 中国科学: D 辑, 2010, 40(12): 1655-1668.
Wang Xin, Wang Zhaoming, Xie Huiwen, et al. Cenozoic salt tectonics and physical models in the Kuqa depression of Tarim Basin, China[J]. Science in China: Ser. D, 2010, 40(12): 1655-1668.

[39] 汪新, 唐鹏程, 谢会文, 等. 库车坳陷西段新生代盐构造特征及演化[J]. 大地构造与成矿学, 2009, 33(1): 57-65.
Wang Xin, Tang Pengcheng, Xie Huiwen, et al. Cenozoic salt structures and evolution in the western Kuqa depression, Tarim Basin, China[J]. Geotectonica Et Metallogenia, 2009, 33(1): 57-65.

[40] 汤良杰, 余一欣, 杨文静, 等. 库车坳陷古隆起与盐构造特征及控油气作用[J]. 地质学报, 2007, 81(2): 145-150.
Tang Liangjie, Yu Yixin, Yang Wenjing, et al. Paleo-uplifts and salt structures and their influence on hydrocarbon accumulations in the Kuqa Depression[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(2): 145-150.

[41] Hubbard J, Shaw J. Uplift of the Longmen Shan and Tibetan plateau, and the 2008 Wenchuan(M=7.9) earthquake[J]. Nature, 2009, 458: 194-197.

[42] 鲁人齐, 何登发, Suppe J, 等. 龙门山中段山前带构造楔的发现及其几何学、运动学特征: 对青藏高原东南缘隆升动力学机制的约束[J]. 地学前缘, 2010, 17(5): 93-105.
Lu Renqi, He Dengfa, Suppe J, et al. The discovery of structural wedges in the central Longmen Mountains front belt and its geometric and kinematic characteristics: Constraints on the dynamical mechanism of uplifting in the southeast margin of Qinghai-Tibet Plateau[J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(5): 93-105.

[43] 李本亮, 雷永良, 陈竹新, 等. 环青藏高原盆山体系东段新构造变形特征: 以川西为例[J]. 岩石学报, 2011, 27(3): 636-644.
Li Benliang, Lei Yongliang, Chen Zhuxin, et al. The neo-tectonic deformation features in the eastern segment of Circum-Tibetan Plateau Basin and Range System: Take the western Sichuan basin as an example[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(3): 636-644.

[44] 何登发, Suppe J, 贾承造. 断层相关褶皱理论与应用研究新进展[J]. 地学前缘, 2005, 12(4): 353-364.
He Dengfa, Suppe J, Jia Chengzao. New advances in theory and application of fault-related folding[J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(4): 353-364.

[45] 管树巍, 李本亮, 侯连华, 等. 准噶尔盆地西北缘下盘掩伏构造油气勘探新领域[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(1): 17-22.
Guan Shuwei, Li Benliang, Hou Lianhua, et al. New hydrocarbon exploration areas in footwall covered structures in northwestern margin of Junggar Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(1): 17-22.

[46] 程晓敢. 祁连山北缘冲断带构造特征研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
Cheng Xiaogan. Structural characteristics of the thrust belt in north margin of Qilian Mountains[D]. Hangzhuo: Zhejiang University, 2006.

[47] 陈汉林, 杨树锋, 肖安成, 等. 酒泉盆地南缘新生代冲断带的变形特征和变形时间[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(4): 488-494.
Chen Hanlin, Yang Shufeng, Xiao Ancheng, et al. Deformation characteristics and time of Cenozoic thrust belt in southern margin of Jiuquan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(4): 488-494.

[48] 管树巍, 李本亮, 何登发, 等. 构造楔形体的识别与勘探: 以准噶尔盆地南缘为例[J]. 地学前缘, 2009, 16(3): 129-137.
Guan Shuwei, Li Benliang, He Dengfa, et al. Recognition and exploration of structural wedges: A case study of the southern margin of Junggar Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(3): 129-137.

[49] 程晓敢, 雷刚林, 陈汉林, 等. 西昆仑山前甫沙—克里阳地区新生代变形特征及油气控制作用[J]. 石油学报, 2011, 32(1): 84-89.
Cheng Xiaogan, Lei Ganglin, Chen Hanlin, et al. Cenozoic structural deformation of the Fusha-Keliyang area in the piedmont of the western Kunlun Mountains and its control on hydrocarbon accumulation[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(1): 84-89.

[50] 徐凤银, 巩庆林, 陈元忠, 等. 柴达木盆地地震地质统层综合研究[R]. 敦煌: 青海油田分公司勘探开发研究院, 2004.
Xu Fengyin, Gong Qinglin, Chen Yuanzhong, et al. Comprehensive research of seismic geology stratum statistics in Qaidam Basin[R]. Dunhuang: Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina Qinghai Oilfield Company, 2004.

[51] Dickinson W R, Klute M A, Hayes M J, et al. Paleogeographic and paleotectonic setting of Laramide sedimentary basins in the central Rocky Mountain region[J]. Geological Society of American Bulletin, 1988, 100: 1023-1039.

[52] Muron P, Mallet J L, Medwedeff D A. 3D sequential structural restoration: Geometry and kinematics[C]. Calgary: AAPG Annual Meeting, 2005, 14: A98.

[53] Müller J P, Guzofski C, Rivero C, et al. New approaches to 3D structural restoration in fold-and-thrust belts using growth strata[C]. Calgary: AAPG Annual Meeting, 2005, 14: A97.

[54] Muron P. 3-D numerical methods for the restoration of faulted geological structures[D]. de Lorraine, France: Institut National Polytechnique de Lorraine, 2005: 141.

[55] 达江, 宋岩, 柳少波, 等. 准噶尔盆地南缘前陆冲断带油气成藏组合及控制因素[J]. 石油实验地质, 2007, 45(4): 355-360.
Da Jiang, Song Yan, Liu Shaobo, et al. Hydrocarbon play and controlling factors in fold-thrust belt of the southern Junggar foreland Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2007, 45(4): 355-360.

[56] Elliott D. The energy balance and deformation mechanisms of thrust sheets[J]. Philosophical Transactions Royal Society of London, 1976, 283: 289-312.

[57] 张国伟, 董云鹏, 赖绍聪, 等. 秦岭—大别造山带南缘勉略构造带与勉略缝合带[J]. 中国科学: D 辑, 2003, 33(12): 1121-1135.
Zhang Guowei, Dong Yunpeng, Lai Shaocong, et al. Mianle tectonic zone and Mianle suture zone on southern margin of Qinling-Dabie orogenic belt[J]. Science in China: Ser. D, 2003, 33(12): 1121-1135.

[58] 闫全人, 王宗起, Hanson A D, 等. 南秦岭横丹浊积岩系: 晚古生代发育于扬子板块被动陆缘上的弧前盆地充填物[J]. 地质通报, 2002, 21(8/9): 495-500.
Yan Quanren, Wang Zongqi, Hanson A D, et al. Hengdan turbidite terrane: Fillings in a Late Paleozoic forearc basin developed on the passive margin of the Yangtze plate[J]. Geological Bulletin of China, 2002, 21(8/9): 495-500.

[59] 邹才能, 徐春春, 汪泽成, 等. 四川盆地台缘带礁滩大气区地质特征与形成条件[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(6): 641-651.
Zou Caineng, Xu Chunchun, Wang Zecheng, et al. Geological characteristics and forming conditions of the large platform margin reef-shoal gas province in the Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(6): 641-651.

第一作者简介：管树巍（1970-），男，江苏沭阳人，博士，中国石油勘探开发研究院高级工程师，主要从事复杂构造解析和建模研究。地址：北京市海淀区学院路 20 号，中国石油勘探开发研究院石油地质实验研究中心，邮政编码：100083。E-mail: guan@petrochina.com.cn

收稿日期：2012-04-17 修回日期：2012-11-08

（编辑 黄昌武 绘图 刘方方）

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net