

复合陆内山前冲断构造转换类型及其成因

方成名¹, 赵利^{1,2}

(1. 中国石化石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126;

2. 山东农业大学 资源与环境学院, 山东 泰安 271018)

摘要:复合陆内山前厚皮构造向薄皮构造的转换类型决定了中国中西部地区山前复杂冲断结构的形成和发育,任何单一构造模式均不能完全概括和解释构造转换及其结构差异形成的机制。通过深—浅层结构联合对比分析,依据构造位移向前传递扩展的形式及其产生的地质结构特征,将山前厚皮向薄皮构造的转换划分为过渡I带、过渡II带、过渡I+II带、无过渡带4类。过渡I带、过渡II带、过渡I+II带型通过基底面拆离滑脱实现厚皮向薄皮构造的转换,并视深层次滑脱层与边界条件形成叠瓦逆冲、三角带、双重构造等不同结构样式;无过渡带型主要以大型逆掩断层实现两者之间的突变式转换,无明显的基底面拆离滑脱,形成以大型推覆构造为主的结构样式。构造转换及其冲断结构差异的形成主要源自“镶嵌式”复合大陆因不同的深部地质结构与边界条件在板缘俯冲、碰撞作用下产生多种形式的构造响应。过渡II带、过渡I+II带型山前冲断构造形成遵循“壳内俯冲与反向拆离冲断”构造模式,无过渡带、过渡I带型则分别符合“壳内双向俯冲与均衡隆升冲断”和“多层次基底拆离滑脱冲断”构造模式。

关键词:冲断结构;构造转换;厚皮构造;薄皮构造;复合陆内造山;中国中西部

中图分类号:TE121.1

文献标识码:A

Compound intracontinental piedmont thrust structure transformation and its formation mechanisms

FANG Chengming¹, ZHAO Li^{1,2}

(1. *Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China;*

2. *College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China*)

Abstract: The transformation types from thick-skinned to thin-skinned structures in compound intracontinental piedmont controls the development of complicated thrust structures in central and western China. No single dynamic model can generalize and explain the causes of the multi-type thrust structure. Joint analysis of deep and shallow structures shows that there are four types of transformation from thick-skinned to thin-skinned structures in the piedmont of central and western China. These are named transition zones I, II, I+II and the non-transition zone, according to the form of forward transfer and expansion of tectonic displacement and the geological structure it produces. The four transformation types have specific structural characteristics. The first three types are mainly converted by basement detachment and slippage. Due to the development of a deep slippage layer and different boundary conditions, different structural styles such as imbricate thrusting, triangular zone and double structure are formed. As to the non-transition type, overthrust faults accommodate the abrupt transformation between thick-skinned and thin-skinned structures, without obvious basement detachment or slippage. Large-scale nappe structure is the main structural style of this transformation type. The difference of transition type and thrust structure is mainly due to the different intracontinental deformation responses of different deep geological structures and boundary conditions in the compound continents with multi-continental blocks splicing together under the action of plate margin subduction or collision. The formation of transitional zone II and transitional zone I+II piedmont thrust structures follows the structural model of “intracrustal subduction and reverse detachment thrust”, while the non-transitional zone and transitional zone I conform to the structural model of “intracrustal bidirectional subduction and balanced uplift thrust” and “multi-level basement detachment and detachment thrust” respectively.

Key words: thrust structure; structural transfer; thick-skinned structure; thin-skinned structure; compound intracontinental orogeny; central and western China

收稿日期: 2019-07-25; 修订日期: 2019-09-30。

作者简介: 方成名 (1980—), 男, 博士, 高级工程师, 从事盆地分析与构造研究。E-mail: fangcm.syky@sinopec.com。

基金项目: 国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”(2017ZX05005-001)资助。

中国大陆是由小型克拉通、众多微地块经过多期拼合而成的“镶嵌式”复合大陆,其组成复杂而不均一、基底结构各异^[1-2],区别于以巨型克拉通为主体的典型大陆板块结构。复合陆内造山是指发生于复合大陆岩石圈内部、远离同期板块边界的造山带,主要分布在古地块的拼接部位。国内不少学者将此类造山视作板缘型造山的延续,称之为陆内俯冲型造山^[3-4]或再生型造山带^[5],亦有学者认为中国复合陆内造山作用与全球普遍发育板内型造山作用类似,具有普遍性^[6]。复合陆内造山伴生的山前冲断带具有基底普遍卷入变形的构造特征^[6-7],亦有别于板缘型造山带以薄皮式构造为主的山前冲断特征^[6-8]。

中国中西部地区分布着 15 个规模不一的山前带,是我国陆域油气勘探的重要组成部分,勘探潜力大。梳理国内外典型山前带油气分布发现,规模油气田主要分布于厚皮向薄皮构造转换的过渡带,且油气赋存的部位也受变形的结构控制^[7,9]。过渡带的构造转换及其结构是决定油气成藏过程与类型的根本条件^[7,9],山前带深部地质结构、物质组成与其所处的空间位置的差异均可产生各具特色的转换变形结构。为此,国内外学者围绕山前冲断结构及样式开展了大量的研究,提出诸多分类模式。PRICE^[10]认为典型前陆冲断变形机制划分 I 型、II 型 2 类构造几何模型;ESCHER 等^[11]提出基于碰撞型造山带紧邻的前陆与后陆同时褶皱的双重倒向模式;贾承造^[12]按盆—山结合部的变形样式划分为叠瓦式、构造楔式、反转式、底辟式 4 类;何登发^[13]按断层是否切入基底划分为厚皮型与薄皮型 2 类,并在此基础上细分 4 种变形类型;管树巍^[14]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 I 型、II 型、III 型和复杂边界制约型 4 类;刘树根、邓宾等^[15-16]从四川盆地周缘盆—山结构的角度将其划分为突变型与渐变型 2 种类型。

“镶嵌式”的大陆地壳结构与复杂的拼合块体相互作用方式,决定了中国中西部地区山前带相比典型前陆冲断带有着更为独特的冲断结构样式^[17-18]。随着大陆构造动力学研究的发展,已逐步重视研究当复合大陆受到板块边缘俯冲、碰撞挤压时,在大陆内部或拼接处产生的影响,并获得一些新的研究进展或新的概念,用以解释这种具有独特结构的山前带成因。归结起来主要有壳内拆离滑脱构造模式^[19-20]、板块碰撞远程效应模型^[21-22]、陆内俯冲与榕挤模式^[2,4,23-24]、深浅构造

转换模式^[25]等,但单一模式难以解释中西部山前地区多类型深部地质结构与浅层多样式变形之间的成因关系,尤其是厚皮构造与薄皮构造之间多类型转换过渡及其形成的动力学机制缺乏合理系统解释。徐旭辉、方成名等^[7,9]在研究中国中西部山前冲断结构分带模式时,提出厚皮构造与薄皮构造之间存在 4 种转换型式,即过渡 I 带、过渡 II 带、无过渡带、过渡 I + II 带,但未对其结构差异及其形成机制进行论述。笔者试图从山前带厚皮构造向薄皮构造的转换类型入手,通过山前地区深部结构与浅层样式对比分析,将中国中西部地区山前带纳入统一的大陆动力学构造体系,探讨不同冲断结构类型之间时空关联属性及其形成机制,以此丰富复合大陆动力学的理论研究,并指导山前带油气勘探实践。

1 山前带形成的构造背景与深部地质结构

1.1 复合陆内的大地构造背景

中国中西部山前带主要分布于复合大陆的块体拼接部位,属于新生代环青藏高原巨型盆体系的组成部分^[17-18,22]。它由塔里木盆地、准噶尔盆地、四川盆地、鄂尔多斯盆地等和天山、昆仑山、龙门山、秦岭、阿尔金山、贺兰山等组成,介于西昆仑山—东昆仑山—龙门山—哀牢山与阿尔泰山—克拉美丽山—北山—阴山北缘—太行山—雪峰山 2 个弧形带之间的区域(图 1)。

从元古宙以来经历多期次的大陆解体与拼合,形成了以塔里木、华北、扬子 3 个古板块为核心,并与准噶尔、阿拉善、松潘、柴达木等 20 多个微古板块之间的 4 期聚合,形成了具有“镶嵌式”结构的复合中国大陆,奠定中、新生代山前冲断的陆壳基底结构和构造格局基础^[1-2,26]。中国中西部大型盆地基底陆块是古生代散布于北方大陆与冈瓦纳大陆之间众多微陆块相互拼贴与增生的产物^[27]。这些陆块经过多期构造事件逐步拼贴于欧亚大陆南缘,至晚古生代末期成为欧亚大陆的组成部分。青白口纪—志留纪,表现为华南洋、古中国洋、昆仑洋、北祁连洋等在这一大地构造旋回中发育、消减,并形成加里东期的前陆冲断带,在塔里木盆地塔中至塔南一带可见保存较好的古冲断带形迹。晚古生代,随着古亚洲洋拼合关闭,形成北方大陆增生的弧盆体系与北准噶尔—克拉美丽—北山—贺根山前陆冲断体系^[27-28]。古生代末期,西伯利亚板块持续向南碰撞挤压,准噶尔盆地西北缘、天山造

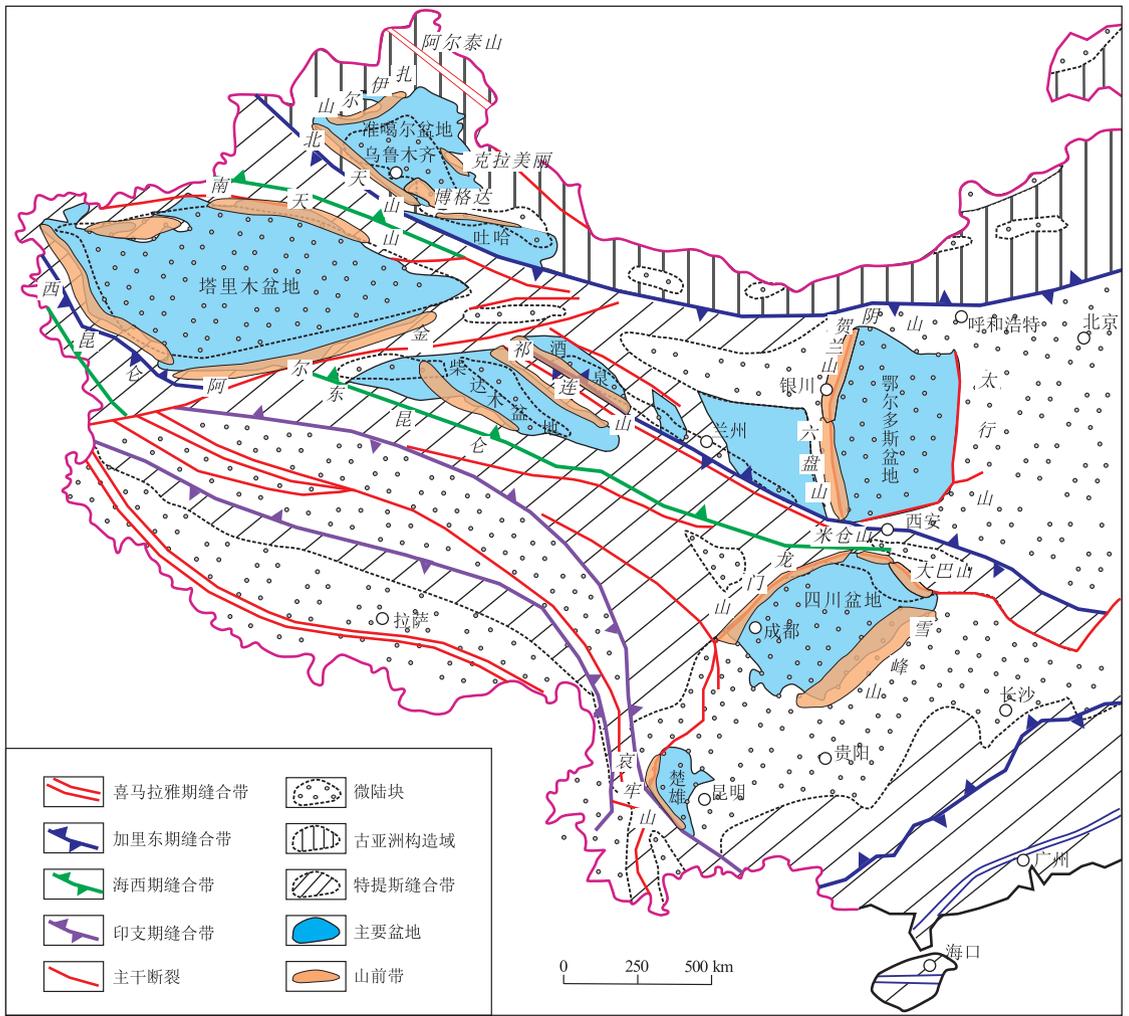


图1 中国中西部复合陆内山前带分布

Fig.1 Distribution of compound intracontinental piedmont belts in central and western China

山带两侧率先发生裂谷反转,形成陆内体制环境下的山前冲断带^[28]。中、新生代,复合的中国大陆在三面受挤的动力边界条件及南北压缩、东西挤出的构造体制下,沿古造山带如秦—祁—昆,产生构造复苏、缩合和陆内扇状双向冲断;抑或沿古裂谷带,如贺兰山、龙门山,隆起反转和不同形式的冲断^[27]。

1.2 深部地质结构

1.2.1 地球物理场与深部构造层

中西部盆地内部具有相对较高的重、磁异常,宽缓高磁异常和区域重力高正异常相对应,表明均具有刚性基底;盆地边缘带多以密集的重力异常梯度带和高磁异常为特征^[29-30]。此外,盆地内的中、下地壳地震波速度大于山前地区,表明前者更加坚硬、刚性^[31]。

1.2.2 地壳与岩石圈结构

中西部盆地和山前带的地壳和岩石圈内多发育高导低速层,并作为塑性层将岩石圈流变学结构分割呈软、硬相间的特征(表1)。而且,不同构造

表1 中国中西部山前地区深部地质结构特征对比

Table 1 Comparison of deep geological structural characteristics in central and western China km

类型	山前带及其莫霍面深度	山前带内塑性层深度	对应盆地莫霍面深度	
山根型	龙门山	~63	18~23	~43
	西昆仑	>65	30~40, 43~53	~45
	南天山	~60	18~23	~45
	六盘山	~49	10~18, 25~30	~43
	南天山	~60	18~29, 34~45	~50
无根型	大巴山	~46	~15, ~30	~43
	雪峰山	~41	25~30	~43
	贺兰山	~44	~20, 25~37	~43
	哈山	~49	~12, 23~33, 32~43	~50

单元内的岩石圈流变学结构迥异。四川、鄂尔多斯、准噶尔与塔里木盆地的岩石圈流变剖面相似,皆表现为“弱地壳—强地幔”结构,脆弱、黏性的下地壳夹于有脆性或刚性的上地壳与上地幔之间,整体呈“果冻三明治”模型;而龙门山、西昆仑、天山

等山前带则不同,其岩石圈流变剖面呈显“奶油蛋糕”模型,表现为“强地壳—弱地幔”结构^[32]。盆山之间流变学结构呈强弱对置状态,当二者相互挤压时,地壳内各层系及与岩石圈地幔之间发生不同程度解耦,造成盆山相互楔入,进而形成“镶嵌式”拼接。比如,龙门山冲断带的深地震构造解释表明:四川盆地的下地壳楔入山前带内,山前带的中地壳楔入盆地内,而四川盆地的上地壳楔入山前带内^[33]。因此,中西部盆山的流变学结构差异为复合陆内山前冲断提供了深部动力学条件。

1.2.3 盆山结合带深部结构差异

中西部典型山前带依据莫霍面深度和下地壳厚度变化,可划分地壳明显增厚的“山根”型和正常厚度的“无根”型 2 类^[7],且具有明显的壳内变形差异。大巴山、雪峰山等山前带垂向结构稳定,壳内层系耦合程度高,莫霍面处变形表现为交互式错断^[34];山前带与盆地之间的莫霍面深度差小于 5 km,山前带几乎没有地壳横向缩短增厚形成的“山根”(表 1)。而龙门山、六盘山等山前带垂向结构相对复杂,壳内层系解耦程度高,莫霍面处变形表现为盆地反冲入造山带内^[35-36];山前带与盆地之间的莫霍面深度差大于 5 km,造山带的下地壳明显增厚,存在明显“山根”。

2 四种转换类型及其结构

基于中西部地区主要山前带深—浅部地质结构的联合分析,以厚皮向薄皮构造转换过程中“构造位移向前扩展传递的形式及其产生的地质结构”为依据,将构造转换划分为 4 种类型,即过渡 I 带、过渡 II 带、过渡 I + II 带和无过渡带。首先依据转换部位是否存在基底面拆离滑脱,划分为过渡带和无过渡带 2 类,再视基底面拆离滑脱冲断产

生结构特征进一步划分。

过渡 I 带、过渡 II 带、过渡 I + II 带构造转换的运动学过程表现为极强的相似性,均通过基底面拆离滑脱实现构造位移的顺层传递或扩展,只是在向前扩展过程中因物质的非均质性、边界条件的差异产生不同方式的应力消减,故而形成各自特征的变形结构。由此可以看出,转换类型与物质非均质性、边界条件存在时空的耦合性和关联性,这已被构造物理模拟实验所证实^[37]。

2.1 过渡 I 带型

过渡 I 带型或称前缘突破型,以地壳深部约 20 km、以壳内“软弱层”为主滑脱面的厚皮式构造向以沉积盖层内泥岩、膏盐岩为主滑脱面的薄皮式构造转换主要通过基底面拆离滑脱实现,并主要形成显露式的叠瓦式冲断体系(图 2a)。构造应力及位移通过基底面滑脱的形式逐步向前缘突破传递,主要形成前展式叠瓦冲断构造,具有弥散式、弧形分布的特点。该类山前带往往具有深部结构分层性好、刚性强且下地壳无明显增厚的“无根”特征,如大巴山前冲断带、川东冲断带等。

2.2 过渡 II 带型

过渡 II 带型或称三角带型,两者转换主要通过基底拆离滑脱与盖层内部反向滑脱冲断构成的楔形构造实现。构造位移与地层缩短主要通过沉积盖层叠覆和被动反向逆冲断层消减、吸收 2 种形式完成,薄皮带变形弱(图 2b)。主要发育浅表单斜、三角带、隐伏叠瓦冲断、断坡背斜等构造样式,具变形带窄、地貌突变的特点。该类山前带往往具有深部结构横向稳定性相对较弱、盆区基底刚性较强且下地壳明显增厚的“山根”特征,如龙门山前北段、南天山前、昆仑山前等。

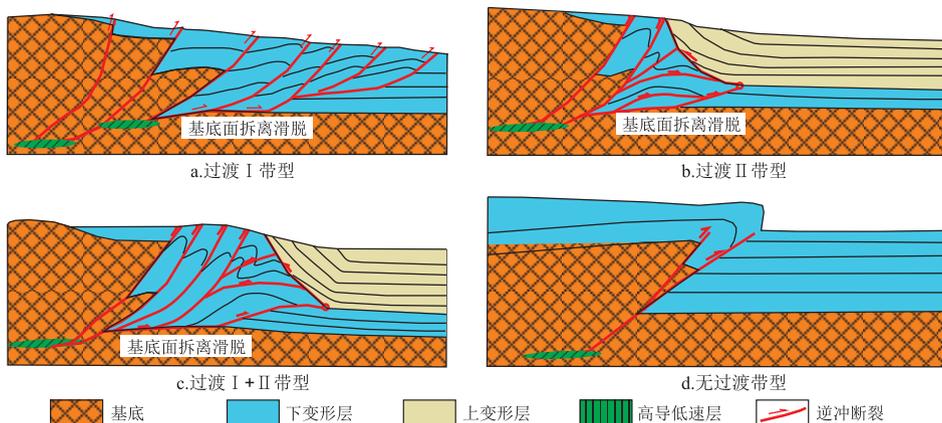


图 2 陆内山前冲断带厚—薄皮构造转换的 4 种型式

Fig.2 Four types of transformation from thick-skinned to thin-skinned structures in an intracontinental piedmont thrust belt

2.3 过渡 I + II 带型

过渡 I + II 带型或称复合型,是指前缘突破与三角带 2 种类型的复合类型,即基底拆离带后缘以断层显露式的叠瓦冲断结构、前缘以隐伏叠瓦冲断或三角带结构(图 2c)。复合型转换相比单一的转换类型具有断面旋转、“r”型断裂组合、幕次性前缘突破等独特的变形或时序演化特征,具有下地壳明显增厚与基底面相对盆区明显抬升的深部结构特征。

2.4 无过渡带型

无过渡带型或称推覆型,主要通过大型推覆断层实现厚皮构造向薄皮构造的转换(图 2d)。快速隆升的造山带前缘地壳主逆冲断裂吸收大部分构造应变,构造变形集中在主断裂周边,主断裂前方变形无论是地层缩短量还是构造位移量均相对较小,并具有扇状双向冲断和深部下地壳增厚的特征。中西部地区博格达山前、库鲁克塔格山前、六盘山前即为典型代表。

3 结构差异形成的控制因素

3.1 组分、结构的不均一性

中西部地区山前带主要发育于复合大陆形成后的中、新生代,并沿微型块体的拼接部位分布,属于大陆板内变形范畴^[2,4-5,7-8,17-18,21-22]。大陆板内构造变形的实质是在已经固化和稳定的地台或岩石圈板块基础上的构造变形^[38],而陆块拼接带客观存在的纵、横向上组成与结构的不均一性则是影响大陆板内变形的主要因素^[8,18]。组成与结构非均一性表现为岩石圈强度的横向不连续性,拼接带相比块体内部的岩石圈强度要小,是构造薄弱带,在后期挤压应力作用下更易重新活动。此外,不同拼接带之间强度差异或克拉通化程度更决定了后期挤压的构造响应程度与冲断结构类型。青藏高原—塔里木板块—天山地块区域的横向、纵向上相比印度板块更具明显非均一性,表现出更为强烈的构造活动及各流变层交错变形、解耦。华北、塔里木、华南板块内部元古代拼接带在中、新生代大陆板内变形阶段表现为很好稳定性,未形成山前冲断变形。

3.2 不同层次滑脱层

滑脱层是影响山前带构造样式的重要因素,亦是构造变形垂向分层的主要因素^[18]。不同层次滑脱层的特征及其对变形的控制作用不同,按发育深度可以分为深、中、浅 3 个层次。

深层次滑脱层主要是指中下地壳内部、壳—幔

塑性层,深度大于 20 km;其对应的滑脱断层在地表表现为韧性剪切变形带,剖面上岩石圈地幔为水平叠置而上、下地壳为交互楔入及构造解耦。

中层次滑脱层主要是指前沉积盆地基底面上、下的软弱层,深度约 10 km;其对应的滑脱断层多为过渡带基底面拆离断层,构造层的变形样式主要为脆性变形、叠瓦冲断和双重构造等,地层垂向叠置。中层次滑脱层是否发育视盆地基底结构与沉积盖层之间物性差异程度,一般刚性基底与沉积地层间由于能干强度差大,易发育基底面滑脱层。

浅层次滑脱层主要是指前沉积地层内部能干层之间相对软弱岩层,其组成岩性一般为膏盐、盐岩、泥岩,深度小于 10 km;其对应的滑脱断层多为薄皮带层间剪切滑动断层。浅层次滑脱层一般控制沉积层内断层相关褶皱的发育及分布。

3.3 边界条件

边界条件是同一冲断带内纵向分段的重要因素,亦是各山前带变形差异的外因,主要包括作用力方式、边界几何特征等条件。

作用力方式一方面是指冲断速率:远离喜马拉雅造山带的山前带,冲断的应力减小、缩短速率降低,构造变形亦相对较弱。新生代西昆仑冲断带的缩短量约 37 km^[39],龙门山南段约 30 km^[40],南天山库车地区约 34 km^[41],北天山约 17 km^[42]。另一方面是指构造走向与冲断方向的夹角:当夹角为锐角时,山前带的部分缩短量将转化为走滑量,断层具备走滑性质,构造变形将更加复杂化。西昆仑冲断带走滑特征强于南天山,当综合缩短量和走滑量时,前者变形量远大于后者。

边界几何特征主要是指相互接触的古板块几何形状或先存构造。当盆地边界为外凸或山前带呈内凹时,冲断带构造形迹呈反向弧形,如西昆仑和南天山冲断带;当盆地边界内凹或山前带外凸时,冲断带构造形迹呈弧形,如大巴山冲断带;当盆地和山前带边界呈直线时,冲断带构造形迹呈直线型,如龙门山冲断带。

4 构造成因模式

中国中西部地区山前冲断带位于复合大陆内部,远离同期活动的板块活动边缘,距离多数在 1 000 km 以上。源自岩石圈尺度的纵弯褶皱作用或层圈解耦作用引发的基底块断隆升、裂谷反转或上冲作用是板内山前冲断的主要构造成因模式^[8],也以此来解释北美拉拉米、澳大利亚中部的 Alice Springs 等厚皮与薄皮构造共存的板内造山

及其山前冲断的成因。显然,中国中西部山前带在构造属性上与此相类似,但在形成的大地构造背景、岩石圈纵横向结构与冲断构造样式上均更为复杂与独特。因而,研究中西部地区 4 种厚皮与薄皮构造的转换机制,需充分考虑中国大陆山前带深部地质结构、盆地基底结构及局部动力学环境的差异,没有一个唯一的构造动力模式可以概括所有。

复合大陆内的板内造山及冲断变形与造山期前已存在的薄弱带在有利应力作用下的复合有关^[6]。在此过程中,盆山耦合过程及其产生的地质结构类型受控于显著的深部结构差异^[15],浅部褶皱冲断变形也受控于复杂的耦合互馈特性的多种机制或块体几何、基底、物质非均性、动力学等多种边界条件^[43]。据此认为,复合陆内山前厚—薄皮构造转换及其冲断结构差异的形成,主要源自“镶嵌式”复合大陆因不同的深部地质结构与空间几何形态,在板缘俯冲、碰撞作用力下产生多种形式的构造响应。

深部地质结构的显著差异是控制山前冲断构造模式的主因,边界条件则决定同一构造模式下结构差异。深部结构的差异,主要表现为下地壳是否局部增厚及代表“塑性层”壳内高导或低速体的发育及复杂程度。“山根”型山前带下地壳增厚及复杂化的壳内“塑性层”与莫霍面是源于盆地为代表的刚性块体向前造山带方向的壳内俯冲或流动,并导致中、上地壳沿深约 20 km 左右的“塑性层”发生反向拆离与多层次滑脱冲断(图 3a)。该模式与“陆内俯冲模式”类似,有别于传统的洋壳俯冲(B 俯冲)和陆—陆俯冲模式(A 俯冲),强调岩石圈地幔、壳内高导低速层的作用,是指中国大陆在中、新生代拼接过程或完全拼接后发生在微陆块与造山带之间的俯冲。壳内俯冲与中、新生代印支板块向欧亚板块俯冲碰撞引起的远程构造效应和上地幔向东蠕散共同诱发的古造山带复活有关^[5,44]。该模式控制了龙门山前中北段、西昆仑山前、米仓山前的三角带型与复合型转换带的形成。三角带型与复合型转换带的区别在于浅部冲断结构的不同,而结构的差异是表现为基底面拆离区是否发育显露式冲断裂。这种结构差异的形成则源于山前带所处空间结构及其受到的边界力学条件。西昆仑山前因更加邻近印度板块与欧亚板块碰撞带,遭受更为强烈的陆内俯冲和反向基底面拆离滑脱,导致显露式冲断区被改造消失殆尽。同时,同一山前带块体几何边界与俯冲及反向拆离滑脱的差异速率往往导致变形过程的非均一性,易发育斜向走滑与

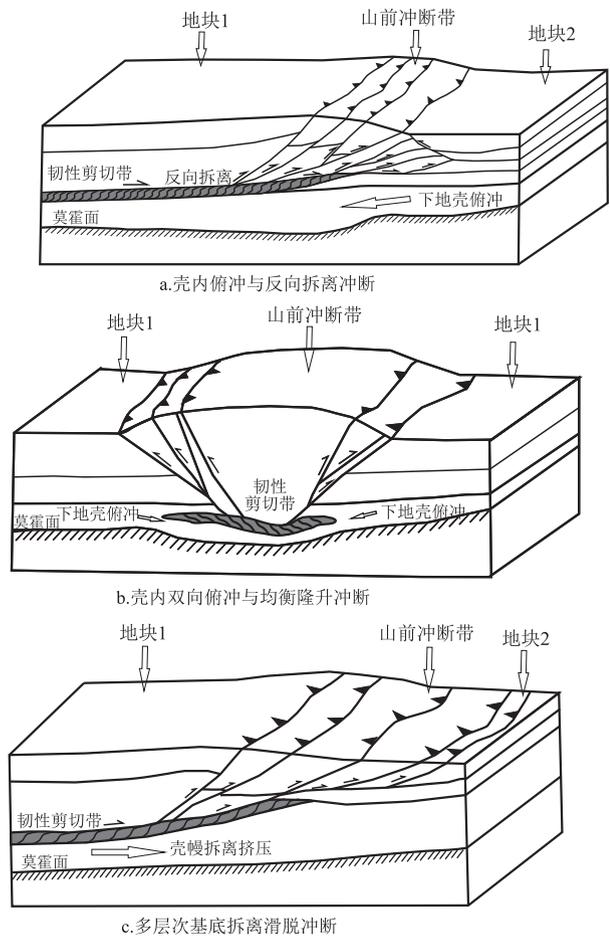


图 3 复合陆内冲断构造模式

Fig.3 Tectonic formation models of compound intracontinental piedmont thrust

横向分段结构特征,这与砂箱构造物理模拟实验相吻合^[43],塔西南山前冲断的“Z”型转折^[45]、准南缘山前的分段性均与此有关。此外,同样具有“山根”的博格达山前,中上地壳缺乏壳内高导或低速体而具有较好的刚性特征,缺乏反向拆离形成的条件。下地壳俯冲增厚的同时,深部发生重力均衡化调整,表现为中上地壳通过快速隆升来实现下地壳密度失衡的反馈。此类山前带往往具有双向深俯冲、浅层背向式高角度冲断的特点(图 3b),是在板内缩合体制下,在壳内圈层拆离解耦作用导致的一种变形。

“无根”型山前带,深部具有较高的耦合特性,在大陆板块边缘受到碰撞聚敛和挤压作用时,在板内岩石圈地壳内部出现的拆离与滑移现象,既没有“A 式俯冲”作用,也不存在莫霍面下凹的“山根”。盆地基底与沉积盖层沿着不同层次的滑脱层(壳幔滑脱带、壳内高导或低速体、基底面、沉积盖层)发生逐级滑脱,形成以犁式断层为主导的叠瓦状冲断层组合楔状构造(图 3c)。雪峰山、龙门

山南段、大巴山前弥散式叠瓦冲断构造的成因均与此相关。但对其动力学的来源,国内外学者却莫衷一是,提出了诸如板缘碰撞远程构造效应、大洋岩石圈低角度俯冲构造模式等2种相对主流的观点。考虑到大陆应力传递衰减、挤压应力方向与大陆构造带在方向上不一致等问题,认为板缘碰撞远程构造不可能是导致板内基底拆离发生的单一动力来源。近年来,运用大洋岩石圈低角度俯冲构造模型,来解释包括雪峰构造带在内的华南大陆构造变形成因,已受到越来越多的学者认同。笔者认为,任何一种模式均不能合理解释所有“无根”型山前多层次拆离滑脱变形的动力来源问题,但不管哪种模式均强调了来自板缘俯冲或碰撞的构造影响。刚性块体远距离的传导与大洋板块低角度俯冲引发的壳幔拆离,均可能是某一山前带变形的最主要或复合的动力来源,具体应视其所处的空间位置与边界条件确定。

5 结论

(1) 山前带主要分布于中国中西部“镶嵌式”复合大陆拼接部位,依据深部地质结构可划分为地壳明显增厚的“山根”型和正常厚度的“无根”型2类,且具有明显不同的壳内流变学特性。龙门山前中北段、天山两侧、昆仑山前、六盘山前、博格达山前等“山根”型山前带具有壳内垂向结构复杂、耦合程度低的特征;大巴山前、龙门山南段、雪峰山前、扎伊尔山前等“无根”型山前带壳内垂向结构相对稳定,耦合程度高。

(2) 复合陆内山前带的结构差异主要表现为厚—薄皮转换型式及其控制下结构差异。依据厚皮构造向薄皮构造转换的位移扩展或消减方式及其产生的结构特征,可将中西部山前带划分为4种类型,即过渡Ⅰ带型、过渡Ⅱ带型、过渡Ⅰ+Ⅱ带型和无过渡带型4种。

(3) 复合陆内山前冲断带结构差异形成主要受控于介入变形的物质结构与板缘作用力方式。物质结构因素包括岩石圈组分与结构的横向不均一性、壳内多层次滑脱层(壳幔、壳内高导或低速层、基底面、沉积盖层);板缘作用力因素包括复合陆内古陆块空间几何形态及板缘作用方式。

(4) 复合陆内山前厚—薄皮构造转换及其冲断结构差异的形成,主要源自“镶嵌式”复合大陆因不同的深部地质结构与空间几何形态在板缘俯冲、碰撞作用下产生多种形式的构造响应。三角带型、复合型山前冲断构造形成遵循“壳内俯冲与

反向拆离冲断”构造模式,推覆型与前缘突破型则分别符合“壳内双向俯冲与均衡隆升冲断”和“多层次基底拆离滑脱冲断”构造模式。

参考文献:

- [1] 任纪舜,王作勋,陈炳蔚,等.从全球看中国大地构造:中国及邻区大地构造图(1:500万)及简要说明书[M].北京:地质出版社,2000:1-74.
REN Jishun, WANG Zuoxun, CHEN Bingwei, et al. China tectonics in the light of global: a brief caption on tectonic map of China and adjacent areas [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2000: 1-74.
- [2] 张渝昌.中国含油气盆地原型分析[M].南京:南京大学出版社,1997.
ZHANG Yuchang. Prototype analysis of petroliferous basins in China [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1997.
- [3] 罗志立,刘树根,赵锡奎,等.试论C-型俯冲带及对中国中西部造山带形成的作用[C]//罗志立.龙门山造山带的崛起和四川盆地的形成与演化.成都:成都科技大学出版社,1994:288-316.
LUO Zhili, LIU Shugen, ZHAO Xikui, et al. Discussion on the C-type subduction zone and its effect on the formation of orogenic belts in the central and western China [C]//LUO Zhili. The rise of the Longmenshan Orogenic Belt and the formation and evolution of the Sichuan Basin. Chengdu: Press of Chengdu University of Science and Technology, 1994: 288-316.
- [4] 刘树根,罗志立,赵锡奎,等.试论中国西部陆内俯冲型前陆盆地的基本特征[J].石油与天然气地质,2005,26(1):37-48.
LIU Shugen, LUO Zhili, ZHAO Xikui, et al. Discussion on essential characteristics of intracontinental-subduction type foreland basins in western China [J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(1): 37-48.
- [5] 刘和甫,汪泽成,熊保贤,等.中国中西部中、新生代前陆盆地与挤压造山带耦合分析[J].地学前缘,2000,7(3):55-72.
LIU Hefu, WANG Zecheng, XIONG Baoxian, et al. Coupling analysis of Mesozoic-Cenozoic foreland basin and mountain system in central and western China [J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(3): 55-72.
- [6] 张长厚.初论板内造山带[J].地学前缘,1999,6(4):295-308.
ZHANG Changhou. A primary discussion on the intraplate orogenic belt [J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6(4): 295-308.
- [7] 方成名.中西部典型山前带冲断结构模式与油气分布[D].武汉:中国地质大学(武汉),2018.
FANG Chengming. Study on the pattern of thrust structure and oil & gas distribution in the typical piedmont thrust belt in the central and western China [D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2018.
- [8] 张长厚.大陆板内构造变形及其动力学机制[J].地学前缘,2008,15(3):140-149.
ZHANG Changhou. A review on the continental intraplate deformation and its dynamics [J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(3): 140-149.
- [9] 徐旭辉,方成名,刘金连,等.中国中西部山前构造变形结构

- 分带模式与油气[J].石油实验地质,2019,41(6):779-790.
- XU Xuhui, FANG Chengming, LIU Jinlian, et al. Deformation zoning model of piedmont thrust, western China, and its petroleum response [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2019, 41(6):779-790.
- [10] PRICE R A. The Cordilleran foreland thrust and fold belt in the southern Canadian Rocky Mountains [C]//MCCLAY K R, PRICE J. Thrust and Nappe Tectonics. London: Blackwell Scientific Publications, 1981, 9(1):427-448.
- [11] ESCHER A, BEAUMONT C. Formation, burial and exhumation of basement nappes at crustal scale: a geometric model based on the Western Swiss-Italian Alps [J]. *Journal of Structural Geology*, 1997, 19(7):955-974.
- [12] 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.
- JIA Chengzao, HE Dengfa, LEI Zhenyu, et al. Petroleum exploration in foreland thrust [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000.
- [13] 何登发, 周路, 雷振宇, 等. 断层相关褶皱原理在前陆冲断带构造建模中的应用 [C]//中国石油勘探与生产分公司. 中国中西部前陆盆地冲断带油气勘探文集. 北京: 石油工业出版社, 2002:75-90.
- HE Dengfa, ZHOU Lu, LEI Zhenyu, et al. Application of fault-related folding principle in structural modeling of foreland thrust belt [C]//Petroleum Exploration and Production Branch of CNPC. Oil and gas exploration collection of the foreland basin thrust belt in central and western China. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002:75-90.
- [14] 管树巍, 何登发, 雷永良, 等. 中国中西部前陆冲断带运动学分类、模型与勘探领域 [J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(1):66-78.
- GUAN Shuwei, HE Dengfa, LEI Yongliang, et al. Kinematic classification, structural modeling and prospective fields of the foreland thrust belts in Midwest China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(1):66-78.
- [15] 刘树根, 邓宾, 李智武, 等. 盆山结构与油气分布: 以四川盆地为例 [J]. 岩石学报, 2011, 27(3):621-635.
- LIU Shugen, DENG Bin, LI Zhiwu, et al. The texture of sedimentary basin-orogenic belt system and its influence on oil/gas distribution: a case study from Sichuan Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(3):621-635.
- [16] 邓宾. 四川盆地中-新生代盆-山结构与油气分布 [D]. 成都: 成都理工大学, 2013.
- DENG Bin. Meso-Cenozoic architecture of basin-mountain system in the Sichuan Basin and its gas distribution [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2013.
- [17] 贾承造, 宋岩, 魏国齐, 等. 中国中西部前陆盆地的地质特征及油气聚集 [J]. 地学前缘, 2005, 12(3):3-13.
- JIA Chengzao, SONG Yan, WEI Guoqi, et al. Geological features and petroleum accumulation in the foreland basins in central and western China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(3):3-13.
- [18] 李本亮, 魏国齐, 贾承造. 中国前陆盆地构造地质特征综述与油气勘探 [J]. 地学前缘, 2009, 16(4):190-202.
- LI Benliang, WEI Guoqi, JIA Chengzao. Some key tectonics characteristics of Chinese foreland basins and their petroleum exploration [J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(4):190-202.
- [19] 丁道桂, 郭彤楼, 胡明霞, 等. 论江南-雪峰基底拆离式构造: 南方构造问题之一 [J]. 石油实验地质, 2007, 29(2):120-127.
- DING Daogui, GUO Tonglou, HU Mingxia, et al. Basement decoupling structure in Jiangnan-Xuefeng: series 1 of the southern structure studies [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2007, 29(2):120-127.
- [20] 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(地球科学), 2008, 38(S1):30-40.
- TANG Liangjie, YANG Keming, JIN Wenzheng, et al. Multi-level slip zone and slip structure deformation of Longmenshan Thrust Belt [J]. *Science China (Series D Earth Sciences)*, 2008, 38(S1):30-40.
- [21] 贾承造, 李本亮, 雷永良, 等. 环青藏高原盆山体系统构造与中国中西部天然气大气区 [J]. 中国科学(地球科学), 2013, 43(10):1621-1631.
- JIA Chengzao, LI Benliang, LEI Yongliang, et al. The structure of Circum-Tibetan Plateau basin-range system and the large gas provinces [J]. *Science China (Earth Sciences)*, 2013, 56(11):1853-1863.
- [22] 李本亮, 贾承造, 庞雄奇, 等. 环青藏高原盆山体系统内前陆冲断构造变形的空间变化规律 [J]. 地质学报, 2007, 81(9):1200-1207.
- LI Benliang, JIA Chengzao, PANG Xiongqi, et al. The spatial distribution of the foreland thrust tectonic deformation in the Circum-Tibetan Plateau basin and range system [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(9):1200-1207.
- [23] 罗志立. 试论中国型(C-型)冲断带及其油气勘探问题 [J]. 石油与天然气地质, 1984, 5(4):315-324.
- LUO Zhili. A preliminary approach on C-subduction and its hydrocarbon prospecting [J]. *Oil & Gas Geology*, 1984, 5(4):315-324.
- [24] 刘树根, 罗志立, 曹树恒. 一种新的陆内俯冲类型: 龙门山型俯冲成因机制研究 [J]. 石油实验地质, 1991, 13(4):314-324.
- LIU Shugen, LUO Zhili, CAO Shuheng. On the mechanism of a new type of intracontinental subduction: the Longmenshan Subduction [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 1991, 13(4):314-324.
- [25] 李涛, 王宗秀, 周高志, 等. 新疆博格达山分段及深浅构造转换关系 [J]. 地学前缘, 2004, 11(3):103-114.
- LI Tao, WANG Zongxiu, ZHOU Gaozhi, et al. The segmentation and the relationship between shallow and deep structures of Bogda Mountain, Xinjiang, Northwest China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, 11(3):103-114.
- [26] 李本亮, 魏国齐, 贾承造, 等. 中国前陆盆地构造地质基本特征及其控制下的油气分布 [J]. 现代地质, 2009, 23(4):575-586.
- LI Benliang, WEI Guoqi, JIA Chengzao, et al. Some key tectonic characteristics of Chinese foreland basins and related petroleum geology [J]. *Geoscience*, 2009, 23(4):575-586.
- [27] 徐旭辉, 高长林, 黄泽光, 等. 中国盆地形成的三大活动构造历史阶段 [J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(2):155-162.

- XU Xuhui, GAO Changlin, HUANG Zeguang, et al. Three stages of tectonic movements in formation of petroliferous basins in China[J]. *Oil & Gas Geology*, 2005, 26(2): 155-162.
- [28] 方成名, 黄泽光. 中国中西部大型盆地差异演化与碎屑岩油气响应[J]. *石油实验地质*, 2016, 38(6): 703-712.
- FANG Chengming, HUANG Zeguang. Differential characteristics of large-scale basin evolution and hydrocarbon response of clastic strata in central-western China[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2016, 38(6): 703-712.
- [29] 马宗晋, 高祥林, 宋正范. 中国布格重力异常水平梯度图的判读和构造解释[J]. *地球物理学报*, 2006, 49(1): 106-114.
- MA Zongjin, GAO Xianglin, SONG Zhengfan. Analysis and tectonic interpretation to the horizontal-gradient map calculated from Bouguer gravity data in the China mainland[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 49(1): 106-114.
- [30] 杨华, 梁月明. 全国航磁 ΔT 异常与中国地学断块构造[J]. *物探与化探*, 2013, 37(6): 957-967.
- YANG Hua, LIANG Yueming. Nationwide aeromagnetic ΔT anomalies and China's geoscience block structures[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2013, 37(6): 957-967.
- [31] 朱介寿. 汶川地震的岩石圈深部结构与动力学背景[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2008, 35(4): 348-356.
- ZHU Jiushou. The Wenchuan earthquake occurrence background in deep structure and dynamics of lithosphere[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2008, 35(4): 348-356.
- [32] 汪洋, 程素华. 中国西部及邻区岩石圈热状态与流变学强度特征[J]. *地学前缘*, 2013, 20(1): 182-189.
- WANG Yang, CHENG Suhua. Thermal state and rheological strength of the lithosphere beneath western part of China and its adjacent region[J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(1): 182-189.
- [33] 高锐, 王海燕, 王成善, 等. 青藏高原东北缘岩石圈缩短变形: 深地震反射剖面再处理提供的证据[J]. *地球学报*, 2011, 32(5): 513-520.
- GAO Rui, WANG Haiyan, WANG Chengshan, et al. Lithospheric deformation shortening of the northeastern Tibetan Plateau: evidence from reprocessing of deep seismic reflection data[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2011, 32(5): 513-520.
- [34] DONG Shuwen, GAO Rui, YIN An, et al. What drove continued continent-continent convergence after ocean closure? Insights from high-resolution seismic-reflection profiling across the Daba Shan in central China[J]. *Geology*, 2013, 41(6): 671-674.
- [35] GUO Xiaoyu, GAO Rui, WANG Haiyan, et al. Crustal architecture beneath the Tibet-Ordos transition zone, NE Tibet, and the implications for plateau expansion[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(24): 10631-10639.
- [36] GUO Xiaoyu, GAO Rui, KELLER G R, et al. Imaging the crustal structure beneath the eastern Tibetan Plateau and implications for the uplift of the Longmen Shan range[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 379: 72-80.
- [37] 赵利, 廖宗廷, 徐旭辉, 等. 陆内山前冲断结构分带的构造物理模拟实验[J]. *石油实验地质*, 2019, 41(6): 871-878.
- ZHAO Li, LIAO Zongting, XU Xuhui, et al. Physical modelling on thrusting structure of zonation in front of an intracontinental orogen[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2019, 41(6): 871-878.
- [38] 宋鸿林. 燕山式板内造山带基本特征与动力学探讨[J]. *地学前缘*, 1999, 6(4): 309-316.
- SONG Honglin. Characteristics of Yanshan type intraplate orogenic belts and a discussion on its dynamics[J]. *Earth Science Frontiers*, 1999, 6(4): 309-316.
- [39] 廖林. 西昆仑新生代构造事件及其沉积响应[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- LIAO Lin. Cenozoic tectonic events and their sedimentary records in the West Kunlun[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [40] 李志刚. 晚新生代龙门山褶皱冲断带地壳缩短变形与构造应力场转换[D]. 南京: 南京大学, 2014.
- LI Zhigang. Late Cenozoic crustal shortening in the Longmen Shan fold-and-thrust belt and tectonics stress field changes[D]. Nanjing: Nanjing University, 2014.
- [41] 周新源, 苗继军. 塔里木盆地西北缘前陆冲断带构造分段特征及勘探方向[J]. *大地构造与成矿学*, 2009, 33(1): 10-18.
- ZHOU Xinyuan, MIAO Jijun. The tectonic segmentation and hydrocarbon exploration of the foreland thrust belt in the northwestern Tarim Basin[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2009, 33(1): 10-18.
- [42] 李本亮, 管树巍, 陈竹新, 等. 楔形构造在山前冲断构造位移量消减中的作用: 以准噶尔盆地南缘为例[J]. *地质学报*, 2012, 86(6): 890-897.
- LI Benliang, GUAN Shuwei, CHEN Zhuxin, et al. The effect of wedge structure on displacement subduction of piedmont thrust structure: a case study of the southern margin of Junggar Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(6): 890-897.
- [43] 邓宾, 赵高平, 万元博, 等. 褶皱冲断带构造砂箱物理模型研究进展[J]. *大地构造与成矿学*, 2016, 40(3): 446-464.
- DENG Bin, ZHAO Gaoping, WAN Yuanbo, et al. A review of tectonic sandbox modeling of fold-and-thrust belt[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2016, 40(3): 446-464.
- [44] 刘和甫. 沉积盆地地球动力学分类及构造样式分析[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 1993, 18(6): 699-724.
- LIU Hefu. Dynamic classification of sedimentary basins and their structural styles[J]. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 1993, 18(6): 699-724.
- [45] 谢会文, 王春阳, 王智斌, 等. 基底滑脱层分布对褶皱冲断带变形影响的物理模拟研究: 以塔西南西昆仑山前褶皱冲断带为例[J]. *高校地质学报*, 2012, 18(4): 701-710.
- XIE Huiwen, WANG Chunyang, WANG Zhibin, et al. The effect of spatial distribution of basement detachment on deformation in a fold and thrust belt: an analogue modeling approach an example of West Kunlun fold-and-thrust belt[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2012, 18(4): 701-710.