

前陆盆地盆山耦合及其物质交换

邓辉, 刘池阳, 王建强

(西北大学大陆动力学国家重点实验室, 地质学系, 陕西 西安 710069)

摘 要: 前陆盆地为汇聚板块边界的典型盆地代表, 其沉降的动力机制主要有构造挠曲、俯冲动力以及各种重力负载。其盆山耦合可观测的表现是各种镜像或对应关系, 包括造山带隆起与盆地沉降, 造山带推进与前陆盆地迁移, 造山作用终止与盆地消亡, 幕式、韵律性的表浅层物质转移等, 其根源是汇聚板块统一的区域地球动力学及运动学过程。盆山耦合过程中物质交换在表浅层完成从山到盆以碎屑物质为主的转移, 在中深层表现为各种脆性断层及方式不一、方向各异的复杂的韧性流变。盆地与造山带是统一区域动力作用的不同产物, 二者在形成、演化过程中表现出复杂的相互直接作用或间接影响。

关键词: 前陆盆地; 沉降动力; 盆山耦合; 物质交换

中图分类号: P544 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-6248(2014)02-0138-08

Coupling and Mass Exchanging in Foreland-thrust Systems

DENG Hui, LIU Chi-yang, WANG Jian-qiang

(State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University,
Xi'an 710069, China)

Abstract: As typical representatives of convergent-type basins, foreland basins subside due to compressive flexural tectonics and, dynamic subducted slabs, as well as various gravitational loads. Events observed in foreland-thrust coupling are corresponding or symmetrical phenomena phenomenon such as orogen rising and basin subsiding, orogen advancing and basin migrating, orogeny ending and basin overfilling, and rhythmic/or cyclic transfusion transfer etc.. Dominated radically by entire dynamics and kinematics in convergence belts, mass exchange during foreland-thrust coupling are represented by clast transfusion transfer from orogen to basin and brittle faults in superficial layers, and heterogeneous ductile flow of multimode and multidirection in deep layers. Both foreland basins and adjacent orogens are resulted from the entire regional dynamics with complicated direct or indirect interactions.

Key words: foreland basins; subsidence dynamics; coupling; mass exchange

地球表面的基本结构是不同尺度的正负构造单元。造山带作为正向构造单元, 多处于强烈剥蚀状态; 而相邻的盆地作为负向构造单元, 则为被剥蚀物质的堆积场所。造山带的隆升和盆地的沉降、岩石

的剥蚀与沉积及其速率、不整合面形成与盆山体系迁移等方面均密切关联, 这些地质构造现象被盆地中的沉积建造所记录。在油气勘探中经过大量的实践以及总结经验和教训的基础上, 中国地质学家于

收稿日期: 2014-01-05; **修回日期:** 2014-03-17

基金项目: 西北大学“十二五”“211 工程”创新人才培养项目“延长期鄂尔多斯盆地南部特征与典型前陆盆地对比研究”(YZZ12012)及国家自然科学基金青年基金“渭北山系抬升时限和过程及其与周邻盆山演化的响应关系”(41102067)共同资助

作者简介: 邓辉(1987-), 男, 陕西宜川人, 矿产普查与勘探专业硕士研究生。E-mail: dengghhui@163.com

20世纪90年代提出盆山耦合理论,旨在以动态的思维指导盆山统一演化研究(吴根耀,2003)。

最初的盆山耦合仅被理解为盆地与相关造山带在时空上变形及其相互作用关系(丁道桂,1999;李思田,1995)。随着研究不断深入,发现相关联的盆山相互作用中,上述表现不仅发生在表浅层,更具重要意义的在于地壳下部乃至地球深部物质运动过程的参与。因此,更多学者将盆山体系与相关的板块运动及其区域动力学背景相结合,认为造山带与盆地的形成演化是统一地球动力学机制和运动过程的响应和结果(刘树根,2003;牛树银,1995;吴根耀,2004,2005),并主张以此为切入点,进一步研究岩石圈的动力学机制(丁道桂,1999;李思田,1995;刘德民,2002;刘和甫,2004;牛树银,1995;吴根耀,2003;张进,2004)。同时,对下地壳韧性流的提出(BIRD, P, 1991; CARTER, N L, 1987; RANALLI, G, 1987; 崔永强, 2004; 何建坤, 2002; 李德威, 2008; 吴功建, 1997; 张新钰, 2006),拓宽了研究盆山相互作用的思路。

根据区域构造动力学环境的不同,可将盆山体系分为汇聚、伸展和走滑3种类型(刘和甫,2000)。研究其盆山耦合关系及其演化可为深入研究地球动力学提供窗口。前陆盆地位于汇聚型板块边界,构造位置重要,油气资源极为丰富。自从库车凹陷及酒西盆地油气勘探取得突破以来,前陆盆地备受油气地质研究者重视(刘池洋,2002)。笔者以前陆盆地为主要剖析对象,探讨盆山耦合的动态过程及其地质作用,包括造山带隆起与盆地沉降,造山带推进与前陆盆地迁移,造山作用终止与盆地消亡,以及整个过程中的物质交换。

1 前陆盆地盆山耦合

有前陆盆地,必有与之有成因联系的收缩造山带,二者在时空上相伴而生、互邻并列;演化上阶段呼应,兴衰相关;成因上密切相关、有机耦合。确定这些内容是确定前陆盆地及其对应特征的必要条件之一。同时前陆盆地盆山耦合至少还应包含各层次物质(能量)交换及盆山相互作用方式(刘池洋,2002;2005)。

1.1 造山带隆起与前陆盆地沉降

收缩造山作用是岩石圈在表浅层发生汇聚、缩

短的过程。在汇聚地区强烈的挤压变形和地壳缩短,发育褶皱冲断带、叠瓦构造和岩层叠覆重复;与地壳或岩石圈横向上缩短的同时,在纵向上发生增厚和隆升。例如,据古地磁资料,青藏高原地区7 Ma至今,青藏高原纵向抬升约3 000~3 500 m,横向缩短了约2 500 km;其中喜马拉雅构造带横向缩短约800 km,形成了宏伟的喜马拉雅山系(蔡厚维,2009;李廷栋,1995)。

前陆盆地沉降的根本原因是区域岩石圈挠曲变形,其动力主要是板块汇聚产生的构造挤压挠曲和俯冲动力,其次为各种重力负载(图1)。构造挤压挠曲是巨大的水平挤压应力作用于岩石圈,使之在垂向发生挠曲,并形成前渊沉降区、前缘隆起区以及后渊沉降区。其水平幅度均为半波长,但纵向振幅向克拉通方向衰减。俯冲动力是地幔楔形区地幔黏性物质运动对上覆岩石圈产生的大范围沉降作用(DECCELLES, P G, 1996)。重力负载由前陆盆地中新堆积的沉积物及汇集的水体所引起。

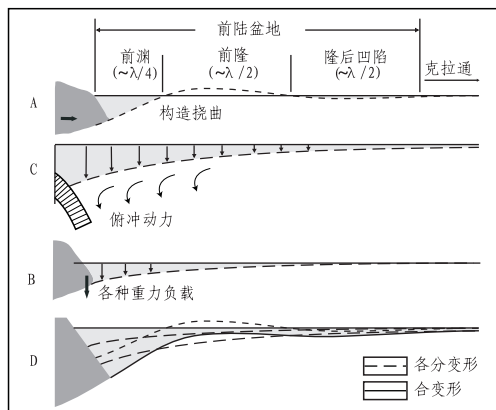


图1 前陆盆地沉降动力图

(Octavian Catuneanu, 2004, 有改动)

Fig. 1 Subsiding dynamics of foreland basins

(Modified from Octavian Catuneanu, 2004)

各种作用的挠曲以不同波长的形式出现,其间可以是建设性的亦可以是破坏性的(DECCELLES, P G, 1996)。不同背景中各种沉降作用所占分量亦不相同。例如,俯冲动力为弧背前陆盆地沉降所特有。因此,在随后的演化中,其前缘隆起经常处于基准面之下而接受沉积(DECCELLES, P G, 2012; DECCELLES, P G, 1996);又如周缘前陆盆地缺乏俯冲动力沉降,前缘隆起常处于剥蚀状态,而陆-陆碰撞产生更大规模的造山带,其重力负载作用相对明显。

同一盆地中不同的作用产生的效果各不相同。例如,弧背前陆盆地中,与构造挠曲作用相比,俯冲动力作用产生的沉降量小,但波及范围较大。同一作用在盆地演化的不同阶段所起作用也有所差别,前期构造构造挠曲作用明显,随着造山带不断隆升与盆内沉积物和水不断汇聚,各种重力负载作用增强。同时,盆地的规模受到岩石圈挠曲刚度的影响:刚性越强,纵向上挠曲幅度越小,但波及范围越广(CATUNEANU, O, 2004; DECELLES, P G, 2012; DECELLES, P G, 1996)。各种重力负载作用从盆地形成到消亡的整个过程中,均对沉降起促进作用(刘池洋, 2008)。

前陆盆地的沉降是对板块汇聚过程中构造挠曲的反应,其特点是在时间上稍滞后于板块汇聚的开始,空间上与造山带构造轴线走向基本一致。在随

后的板块持续汇聚过程中,不断隆升的造山带与不断沉降的前陆盆地之间高差的持续增加,为整个盆山系统表浅层物质交换提供了先决条件。

1.2 造山带推进与前陆盆地迁移

随着板块的持续相向运动,汇聚边界地壳不断缩短,以造山带为代表的汇聚边界不断向克拉通方向迁移。相应地,整个前陆盆地系统也在朝克拉通方向作横向相对迁移。所谓迁移并非整个盆山岩石圈的完全横向运动,而是演化过程中盆山多元结构以波动方式传向克拉通(图 2)。前渊迁移的距离从小于 100 km 到 200 km 甚至更多(CATUNEANU, O, 2004),但在平行于造山带方向不同地区有别。例如,从坎佩尼阶早期到始新世末期,西加拿大盆地南部前渊向东迁移了 200 km,而北部只有 50 km (CATUNEANU, O, 2000)。

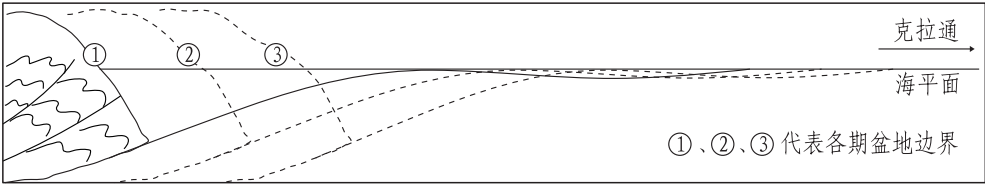


图 2 前陆盆山体系统缩短(迁移)示意图(刘池洋等, 2002, 有改动)

Fig. 2 Lateral shortening(migrating) of foreland-thrust system(Modified from Liu Chiyang et al. , 2002)

随着造山带和前陆盆地向陆迁移,早期邻近造山带前渊附近的沉积物,在后期褶皱冲断变形中多被卷入而成为造山楔的一部分出露地表,遭受剥蚀,成为新沉积区的物源,表现出迁移中改造与建造同步的特点(刘池洋, 2002)。这种现象在中新世库车再生前陆盆地中非常典型(刘志宏, 2000)。

相邻板块汇集的强度和方向因地而异,随时有变,在板块汇聚过程中盆山体系统常常同时受其他块体运动的影响而发生不同程度的斜向运动或走滑作用,致使逆冲方向和盆山迁移方向也会发生多期次的变化。中国大陆为多块体拼接,这种情况更为常见。例如,川西前陆盆地前渊在中侏罗世早期位于米仓山前,前陆逆冲方向由北东向转为近东西向,中期又移至大巴山前,挠曲变形变为北西向,早白垩世重新回到米仓山前,古近纪时已到雅安—名山一带(陈竹新, 2008)。

造山楔向前推进过程中,如果前陆基底卷入变形,将前陆盆地部分分割、抬升,成为造山带内相对独立的构造凹地,称为分裂前陆盆地(刘池洋, 2002;

刘和甫, 1995)。例如,美国落基山拉勒米构造带中的盆地(J, B C, 1995)。

值得注意的是,前陆盆地的沉降受诸多动力综合控制,所以沉降幅度最大之处,即沉降中心的位置是诸多因素共同控制的结果,并非单一的构造挤压挠曲所确定。因此,前陆盆地沉降中心的迁移也是构造挠曲、俯冲动力、重力负载等变量综合变化的函数,而非单一的造山楔逆冲推覆作用的结果。所以,沉降中心或沉积中心的迁移速率不能简单地看作造山楔推进的速率。

1.3 造山作用终止与盆地消亡

板块间持续挤压汇聚的结束将使造山作用停止,盆地的挤压挠曲应力逐渐递减并释放,沉降的动力仅剩静负载作用。强烈的剥蚀使得静负载作用不断减弱,均衡抬升作用相对增强,前渊虽可发生弱沉降,但其速率远低于物源供给,最终使得前陆盆地的规模逐渐变小并被填满而趋于消亡。此时前陆盆地所处位置、盆地面貌与开始发育时已大不相同。

不断减弱的静负载作用与均衡抬升共同作用于前陆盆地,使得前渊区域变窄,前缘隆起再次抬升,常处于剥蚀状态,前陆盆地的多元结构向造山带方向较小幅度迁移,其最明显表现为 hingelines(前隆与前渊的接触线)的回迁(CATUNEANU, O, 2004)

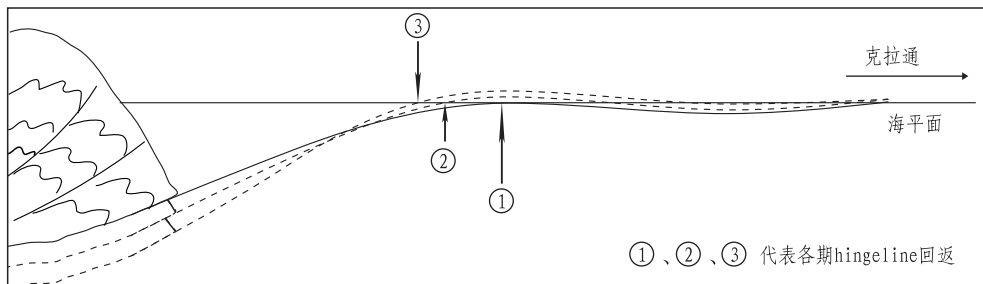


图3 前陆盆地对造山作用终止的响应示意图(Octavian Catuneanu, 2004, 略改动)

Fig. 3 Flexural response to an orogen that ends(Lightly modified from Octavian Catuneanu, 2004)

前陆盆地与相关联收缩造山带近平行展布于汇聚板块边界,且造山带开始隆升之时亦是前陆盆地沉降之际。在盆山体系向克拉通迁移过程中,山体隆升与盆地沉降的强度基本同时达到高峰,并在板块汇聚结束之时共趋消亡。在演化中,物质在表浅层从造山带向盆地转移,其保存的组构记录着各阶段前陆盆地与关联造山带之间动态、呼应的耦合关系。

2 表浅层物质转移的幕式韵律性

表浅层的物质转移主要以碎屑物质形式从造山带源区到盆地沉积区的转移。该过程受构造作用控制明显,主要表现为对物源、可容空间变化以及搬运、沉积形式的影响或控制。例如,构造作用直接控制着剥蚀区和沉积区的时空分布,进而影响沉积物搬运、充填和展布;全球性构造运动在一定程度上影响海平面的变化,间接影响基准面的升降;区域范围构造变动可通过改造局部大气环流,间接影响气候变化和风化、剥蚀、搬运以及沉积作用的方式,从而影响沉积物展布。其中,前两者研究相对较为深入,而对后者的研究较为薄弱(DECELLES, P G, 2012)。

前陆盆地的开始以缩造山带碎屑物质的首次较广泛不整合覆盖下伏克拉通为标志。在演化中盆山相互作用一般模式是:板块碰撞初期,由于前陆岩石圈迅速沉降,而山体隆升不足,物源供给有限,盆地处于沉积饥饿状态,除边缘外多为速率较慢的深水

(图3)。一个现代的实例是西加拿大前陆盆地,其 hingeline 在早期远离造山带而在晚期向造山带回迁;位于前缘隆起区的艾伯塔地区古新统 Paskapoo 组现今正在遭受剥蚀(CANT, D J, 2009; LECKIE, D A, 1992)。

细粒沉积;随着山体隆升加剧,水和沉积物重力负载作用增强,沉降与剥蚀、沉积速率均达到高峰,盆地过渡为近补偿作用阶段,以浅水较粗碎屑沉积为主;造山作用晚期,盆地萎缩而山体仍有足够充分物源供应,沉积体以粗碎屑的陆相磨拉石建造为主。构造迁移使得各阶段沉积物进积于下伏沉积物之上,最终沉积体宏观上表现为向上变粗的粒序层。

逆冲楔多以幕式向前推进扩张,每一次扩展均与同期相关沉积层序对应,代表某一沉积旋回。其沉积物在横向上粒度、成分及相带分布具有明显规律性。同时,造山带内岩浆、火山作用影响,以及结晶基底的抬升暴露等事件均可导致遭受风化剥蚀的母岩发生变化。因此,相邻层序被不同规模的不整合面或岩性界面分隔。每个连续的层序记载古地理格局的重大变化,其粒度、厚度、碎屑物质成分反应山脉剥蚀的类型、速率和母岩类型(刘池洋, 2005)。因此,层序内部在纵向上又表现出一定韵律性。在幕式构造与全球海平面升降共同影响下,表浅层碎屑物呈幕式、韵律式从造山带向盆地内部转移,表现为宏观向上变粗的地层又由多个旋回的韵律层构成。一个典型的实例为西加拿大盆地(LECKIE, D A, 1992),其碰撞开始、火山作用和造山作用停止等构造事件及全球海平面升降被5个旋回地层所记录。

海平面升降对陆内前陆盆地产生影响相对较小。因此,陆内收缩造山带与前陆盆地之间表浅层物质转移受幕式构造控制作用相对更明显,该特点在中国西

部诸前陆盆地中表现比较明显(顾家裕,2005)。

3 各层间物质交换

以往关于大陆岩石圈的刚性结构模式已表现出很大的局限性,取而代之的是“三明治”结构:上岩石圈(中上地壳)和下岩石圈(地幔部分)表现为刚性,中部(下地壳)表现为韧性(BIRD, P, 1991; CARTER, N L, 1987; RANALLI, G, 1987; 崔永强, 2004; 何建坤, 2002; 李德威, 2008; 吴功建, 1997; 张新钰, 2006), 并已有学者对其韧性流变进行描述(崔永强, 2004; 李德威, 2001, 2008; 余绍立, 2006; 张新钰, 2006)。较深层次中, 岩石圈的汇聚本身就是由前陆地区到造山带的大规模横向物质流。在垂向上, 前陆岩石圈区域范围的沉降引起深部物质的大量转移, 在地表产生的可容空间为剥蚀物所充填, 蚀顶后的山体又为构造抬升所弥补, 构成多圈层物质混合交换; 再者, 有学者提出下地壳垂向的韧性流可在造山带形成挤出构造。例如, 在喜马拉雅造山带中, 高喜马拉雅结晶体是沿着其南侧向北倾斜的中央逆断

层和北侧绒布寺断层垂向挤出的楔状体(BURCH-FIEL, B C, 1985; V, H K, 1992; 曾佐勋, 2001)。

值得一提的是, 在以往文献中多强调构造控制剥蚀、沉积作用而对其反作用重视不够。Fielding指出青藏高原南缘中新世以来至少被剥蚀掉 25 km (FIELDING, E J, 1996)。发生在表浅层如此巨量物质的转移需要区域性物质重组(构造抬升)方可平衡, 且蚀顶作用愈强, 均衡调整就愈烈(F, A, 1970; LEEDER, M, 1991; P, P, 1988)。在均衡调整过程中, 下地壳韧性流变被认为起到重要的桥梁作用(张新钰, 2006)。

汇聚板块边界发生收缩隆升、地壳加厚实际上是岩石圈各层物质在造山带的聚集, 并发生各方向顺层或穿层的运动, 伴随巨大的能量交换。各圈层物质交换方式多样(图 4): 在表层多表现为外地质动力为驱动的碎屑物质流动; 在中、深部以各种脆性断层(中上地壳)、韧性流(下地壳)为主导, 伴有规模不一、方式各异的层间转移(火山、岩浆作用, 垂向挤压韧性流等)。至少在物质转移方向上, 各种方式相互补充, 对立统一。

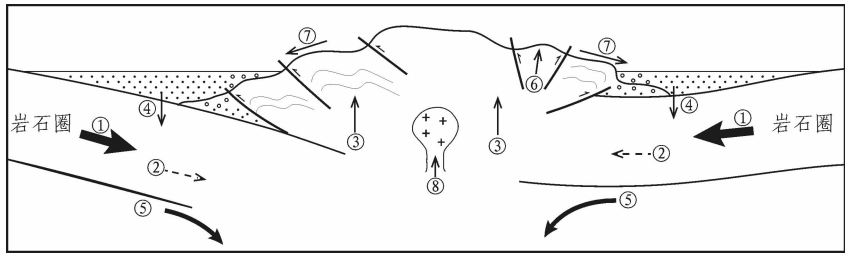


图 4 前陆盆山体物质交换示意图

Fig. 4 Mass exchange in foreland-thrust system

- ①. 岩石圈汇聚; ②. 下地壳层流; ③. 均衡抬升; ④. 盆地岩石圈沉降、沉积物压实; ⑤. 软流圈地幔流; ⑥. 各种逆冲推覆及造山带挤出构造; ⑦. 表层碎屑物质转移; ⑧. 各种岩浆、火山

地球深部物质(能量)存在明显的不平衡性, 在趋于平衡的运动过程中又不断地出现新的不平衡。打破物质稳定平衡和趋于物质稳定平衡是地球较深部重力均衡的动力(刘池洋, 2008), 也应作为前陆盆山各层次物质交换的重要动力。

4 讨论

造山带的隆起为盆地沉降提供负载, 而盆地接受造山带蚀顶产物为其持续隆升减小阻力, 其过程

伴随着巨大的物质和能量交换。

并非所有相关联的事物之间均可用简单的因果关系解释, 很多情况诸多事物或现象其实是某一作用的结果, 并相互影响。前陆盆地与收缩造山带为汇聚板块边界统一的内动力地质作用在同期不同的产物, 二者在成因上并非简单的因果或主动、被动关系, 而是在形成、演化过程中表现出相互直接作用或间接影响的一对耦合体。

在研究盆山耦合中, 已有很多学者使用数值模拟方法, 而其绝对准确性难以确保。同时地质体的

背景、规模等影响参数复杂多变,在某一地区模拟出来的结果并不一定适用于另一地区。因此,笔者更倾向于在定量化过程中加强对定性问题的深化,以免遭受“蝴蝶效应”^①的干扰。

下地壳韧性流的提出,很大程度丰富了研究盆山运动模式的思路。未来以盆山耦合为窗口对深层次岩石圈动力机制研究的深化,将更多依赖于对深部地球物理资料的取得和认识。

参考文献(References):

蔡厚维. 青藏高原的现今地壳活动性 [J]. 西北地质, 2009, 42(1): 34-42.

Cai Houwei. Present Crustal Activity Tibetan Plateau [J]. Northwestern Geology, 2009, 42(1): 34-42.

曾佐勋, 杨巍然, Neubauer Franz, 等. 造山带挤出构造 [J]. 地质科技情报, 2001, 20(1): 1-7.

Zeng Zuoxun, Yang Weiran, Neubauer Franz, et al. Extrusion tectonics in orogenic belt [J]. Geological Science and Technology Information, 2001, 20(1): 1-7.

陈竹新, 贾东, 魏国齐, 等. 川西前陆盆地中-新生代沉积迁移与构造转换 [J]. 中国地质, 2008, 35(3): 472-481.

Chen Zhuxin, Jia Dong, Wei Guoqi, et al. Meso-Cenozoic sediment transport and tectonic transition in the western Sichuan foreland basin [J]. Geology in China, 2008, 35(3): 472-481.

崔永强, 李杨鉴. 软流层、中地壳与盆-山系 [J]. 地球物理学进展, 2004, 19(3): 554-559.

Cui Yongqiang, Li Yangjian. Asthenosphere, middle crust and basin-mountain system [J]. Progress in Geophysics, 2004, 19(3): 554-559.

丁道桂, 刘伟新, 崔可锐. 造山带与盆地构造耦合关系研究——以塔里木盆地为例 [M]. 北京: 地震出版社, 1999: 364-372.

Ding Daogui, Liu Weixin, Cui Kerui. Compiling of orogens and basins: An example from Tarim basin. Seismological Press, Beijing, 1999: 364-372.

顾家裕, 张兴阳. 中国西部陆内前陆盆地沉积特征与层序格架 [J]. 沉积学报, 2005, 23(2): 187-193.

Gu Jia yu, Zhang Xingyang. Sedimentary Characteristics and

Sequence Framework of Intracontinental Foreland Basin in the Western China [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2005, 23(2): 187-193.

何建坤, 刘金朝. 下地壳流变与造山带同挤压期地壳伸展的动力学关系 [J]. 地球物理学报, 2002, 45(4): 483-496.

He Jiankun, Liu Jinchao. Lower-crust ductile flow and its dynamical relation with syn-collision crustal extension in orogenic belt [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2002, 45(4): 483-496.

李德威. 大陆下地壳流动: 渠流还是层流? [J]. 地学前缘, 2008, 15(3): 130-139.

Li Dewei. Continental lower crustal flow: channel flow or laminar flow? [J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(3): 130-139.

李德威, 王家映. 大陆下地壳地球物理异常及其构造意义 [J]. 地质科技情报, 2001, 20(3): 11-15.

Li Dewei, Wang Jiaying. Geophysical anomaly of continental lower crust and its tectonic significance [J]. Geological Science and Technology Information, 2001, 20(3): 11-15.

李思田. 沉积盆地的动力学分析——盆地研究领域的主要趋向 [J]. 地学前缘, 1995, 2(3): 1-8.

Li Sitian. Geodynamics of sedimentary basins—the main trend of basin research [J]. Earth Science Frontiers, 1995, 2(3): 1-8.

李廷栋. 青藏高原隆升的过程和机制 [J]. 地球学报, 1995(1): 1-9.

Li Tingdong. The Uplifting Procees and Mechanism of the Qinhai-Tibet Plateau [J]. Acta Geoscientia Sinica, 1995(1): 1-9.

刘池洋. 盆地构造动力学研究的弱点、难点及重点 [J]. 地学前缘, 2005, 12(3): 113-124.

Liu Chiyang. The weakness, difficulty and key point in the study of basin tectonic dynamics [J]. Eart h Science Frontiers, 2005, 12(3): 113-124.

刘池洋. 沉积盆地动力学与盆地成藏(矿)系统 [J]. 地球科学与环境学报, 2008, 30(1): 1-23.

Liu Chiyang. Dynamics of Sedimentary Basin and Basin Reservoir(Ore) Forming System [J]. Journal of Earth Sci-

① 蝴蝶效应(The Butterfly Effect)是指在一个动力系统中,初始条件下微小的变化能带动整个系统的长期的巨大的连锁反应。这里指定量开始时微小的误差难免导致最终结论的完全不同。

- ences and Environment, 2008, 30(1): 1-23.
- 刘池洋, 赵红格, 杨兴科, 等. 前陆盆地及其确定和研究 [J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(4): 307-313.
- Liu Chiyang, Zhao Hongge, Yang Xingke, et al. Foreland basin and its definition and research [J]. OIL & GAS GEOLOGY, 2002, 23(4): 307-313.
- 刘德民, 李德威. 造山带与沉积盆地的耦合——以青藏高原周边造山带与盆地为例 [J]. 西北地质, 2002, 35(1): 15-21.
- Liu Demin, Li Dewei. The coupling relationship between the orogens and the sedimentary basins: An example from Qinghai-Tibet plateau and its surrounding basins [J]. Northwestern Geology, 2002, 35(1): 15-21.
- 刘和甫. 盆山耦合类型 [J]. 地学前缘, 2000, 7(4): 469.
- Liu Hefu. Types of basin-range coupling [J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(4): 469.
- 刘和甫. 前陆盆地类型及褶皱-冲断层样式 [J]. 地学前缘, 1995, 2(3/4): 59-63.
- Liu Hefu. Classification of foreland basins and fold thrust style [J]. Earth Science Frontiers, 1995, 2(3/4): 59-63.
- 刘和甫, 李晓清, 刘立群, 等. 走滑构造体系盆山耦合与区带分析 [J]. 现代地质, 2004, 18(02): 139-150.
- Liu Hefu, Li Xiaoqing, Liu Liqun, et al. Petroleum play analysis and strike slip system basin mountain coupling [J]. Geoscience, 2004, 18(02): 139-150.
- 刘树根, 罗志立, 赵锡奎, 等. 中国西部盆山系统的耦合关系及其动力学模式——以龙门山造山带-川西前陆盆地系统为例 [J]. 地质学报, 2003, 77(2): 177-186.
- Liu Shugen, Luo Zhili, Zhao Xikui, et al. Coupling Relationships of Sedimentary Basin-Orogenic Belt Systems and Their Dynamic Models in West China: A Case Study of the Longmenshan Orogenic Belt-West Sichuan Foreland Basin System [J]. Acta Geologica Sinica, 2003, 77(2): 177-186.
- 刘志宏, 卢华复, 李西建, 等. 库车再生前陆盆地的构造演化 [J]. 地质科学, 2000, 35(4): 482-492.
- Liu Zhihong, Lu Huafu, Li Xijian, et al. Tectonic evolution of Kuqa rejuvenated foreland basin [J]. Scientia Geologica Sinica, 2000, 35(4): 482-492.
- 牛树银, 孙爱群, 白文吉. 造山带与相邻盆地间物质的横向迁移 [J]. 地学前缘, 1995, 2(1): 85-92.
- Niu Shuyin, Sun Aiqun, Bai Wenji. Lateral migration of the lithospheric material between orogenic zones and adjacent basins [J]. Earth Science Frontiers, 1995, 2(1): 85-92.
- 吴根耀, 马力. “盆”“山”耦合和脱耦在含油气盆地分析中的应用 [J]. 石油实验地质, 2003, 26(6): 648-660.
- Wu Genyao, Ma Li. Orogeny and coupled/decoupled basin developing: application in petroliferous basin analysis [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2003, 26(6): 648-660.
- 吴根耀, 马力. “盆”“山”耦合和脱耦: 进展, 现状和努力方向 [J]. 大地构造与成矿学, 2004, 28(1): 81-97.
- Wu Genyao, Ma Li. Orogeny and coupled/decoupled basin development: a review [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2004, 28(1): 81-97.
- 吴根耀, 马力. “盆”“山”耦合和脱耦的反转点和切入点研究 [J]. 石油实验地质, 2005, 27(1): 8-17.
- Wu Genyao, Ma Li. An approach to the study of inversion points and tangency-in points for orogeny and coupled/decoupled basin development [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2005, 27(1): 8-17.
- 吴根耀, 马力. 试论“盆”“山”的耦合和脱耦及其运动学 [J]. 石油实验地质, 2003, 25(2): 99-109.
- Wu Genyao, Ma Li. An approach to orogenesis-coupled/decoupled basin development and its kinematics [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2003, 25(2): 99-109.
- 吴功建. 中国地学断面地球物理研究的进展和展望 [J]. 地球物理学报, 1997, 51(4): 110-120.
- Wu Gongjian. Advances and prospects of geophysical research for China geoscience transects [J]. Chinese J. Geophys, 1997, 51(4): 110-120.
- 余绍立, 季建清, 陈建军, 等. 下地壳流变层对青藏高原及其周边大尺度地貌的制约 [J]. 地质科技情报, 2006, 25(5): 1-7.
- Yu Shaoli, Ji Jianqing, Chen Jianjun, et al. Lower Crust Flow and Large-Scale Geomorphology of Qinghai-Tibet Plateau [J]. Geological Science and Technology Information, 2006, 25(5): 1-7.
- 张进, 马宗晋, 任文军. 对盆山耦合研究的新看法 [J]. 石油实验地质, 2004, 26(2): 169-175.
- Zhang Jin, Ma Zongjin, Ren Wenjun. Thinking on the present research of basin-mountain Coupling [J]. Petroleum

- Geology & Experiment, 2004, 26(2): 169-175.
- 张新钰, 季建清, 韩宝福, 等. 地表剥蚀、下地壳流变与造山作用研究进展 [J]. 地球科学进展, 2006, 21(5): 521-531.
- Zhang Xinyu, Ji Jianqing, Han Baofu, et al. Research Advances in Erosion, Rheology of the Lower Crust and Orogeny [J]. Advances in Earth Science, 2006, 21(5): 521-531.
- Bird P. Lateral Extrusion of Lower Crust From Under High Topography in the Isostatic Limit [J]. J. Geophys. Res, 1991, 96(B6): 10275-10286.
- Burchfiel B C, Royden L H. North-south extension within the convergent Himalayan region [J]. Geology, 1985, 13(10): 679-682.
- Cant D J, Stoc kmal G S. Some Controls on Sedimentary Sequences in Foreland Basins: Examples from the Alberta Basin [M]. Tectonic Controls and Signatures in Sedimentary Successions, Oxford: Blackwell Publishing Ltd, 2009, 49-65.
- Carter N L, Tsenn M C. Flow properties of continental lithosphere [J]. Tectonophysics, 1987, 136(1): 27-63.
- Catuneanu O. Retroarc foreland systems-evolution through time [J]. Journal of African Earth Sciences, 2004, 38(3): 225-242.
- Catuneanu O, Sweet A R, Miall A D. Reciprocal stratigraphy of the Campanian-Paleocene Western Interior of North America [J]. Sedimentary Geology, 2000, 134(3/4): 235-255.
- Decelles P G. Foreland basin systems revisited: variations in response to tectonic settings [M]. Blackwell Publishing Ltd, 2012.
- Decelles P G, Giles K A. Foreland basin systems [J]. Basin Research, 1996, 8(2): 105-123.
- F A. Functional relationships between denudation, relief and uplift in large mid-latitude drainage basins [J]. American Journal of Science, 1970, 268: 243-263.
- Fielding E J. Tibet uplift and erosion [J]. Tectonophysics, 1996, 260(1/2/3): 55-84.
- J B C, V I R. Tectonics of sedimentary basins [M]. Blackwell Science Publication, London, 1995.
- Leckie D A, Smith D G. Regional setting, evolution, and depositional cycles of the Western Canada Foreland Basin [C]. 1992.
- Leeder M. Denudation, vertical crustal movements and sedimentary basin infill [J]. Geologische Rundschau, 1991, 80(2): 441-458.
- P P, M S. Continental erosion and large-scale relief [J]. Tectonics, 1988, 7: 563-582.
- Ranalli G, Murphy D C. Rheological stratification of the lithosphere [J]. Tectonophysics, 1987, 132(4): 281-295.
- V H K, R P R, B H T, et al. Simultaneous Miocene extension and shortening in the Himalayan orogen [J]. Science, 1992, 258: 1466-1470.