

盆山结构与油气分布 ——以四川盆地为例*

刘树根 邓宾 李智武 孙玮

LIU ShuGen, DENG Bin, LI ZhiWu and SUN Wei

成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 成都 610059

State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

2010-09-20 收稿, 2011-01-30 改回.

Liu SG, Deng B, Li ZW and Sun W. 2011. The texture of sedimentary basin-orogenic belt system and its influence on oil/gas distribution: A case study from Sichuan basin. *Acta Petrologica Sinica*, 27(3): 621–635

Abstract Based on geomorphology, structure, texture and evolution, the texture of sedimentary basin-orogenic belt system in Sichuan basin and its peripheral orogenic zones could be classified into two types, which are linearly abrupt margin-plate systems and diffusely gradual interior-plate systems. The linearly abrupt margin-plate systems include Sichuan basin and its surrounding Mount Longmen, Mount Micang and Mount Daba, which are not only the western and northern marginal areas of Sichuan basin, but also the western margin of Yangtze plate in south China. The systems possess clearly different lithospheric textures, abrupt boundaries and great contrast in today's geomorphology between the basin and mountains with typical fold-thrust belts and foreland basins. The formation and evolution of the margin-plate systems is controlled by the differences of lithospheric textures between the basin and the mountains and evolutionary process of the surrounding mountains. The diffusely gradual interior-plate systems are composed of Sichuan basin and its adjacent Mount Qiyue, Mount Dalou and Mount Daliang, which are the eastern and southern marginal areas of Sichuan basin, and located within the Yangtze plate. There are the similar lithospheric texture and gradual boundaries between the basin and the adjacent mountains without foreland basins and large-scale fold-thrust belts. The formation and evolution of the interior-plate system is made by the tectonic deformation outside the basin and multi-layer detachment within the sedimentary cover of the basin. The evolutionary process of the basin and orogen systems has a great control on today's oil/gas distribution chiefly through the effect on petroleum preserving conditions in Sichuan basin. Today's medium-large scale gas accumulations and most of the natural gas proved reserves in Sichuan basin were mainly distributed in the areas influenced by the linearly abrupt margin-plate systems, especially those under the control of Qinling Orogenic zone.

Key words Texture of basin and orogen system; Coupling relationship between basin and orogen; Oil/gas distribution; Sichuan basin

摘要 根据四川盆地与周缘造山带地貌学、深浅部结构构造及动力学机制等, 其盆山结构可分为板缘(龙门山、米仓山和大巴山)突变型和板内(齐岳山、大娄山和大凉山)渐变型两类。板缘突变型盆山结构具有显著深部结构差异性, 浅部构造具典型冲断带(山)和前陆盆地(盆)二元结构, 其盆山耦合关系主要受控于深部结构的差异性和造山带的形成演化过程, 现今山盆地貌反差大, 地形坡度陡, 盆山边界明晰。板内渐变型盆山结构, 则深部结构特征相似, 浅部构造具挤压-拗陷结构、不发育大规模冲断推覆, 现今山盆地貌反差小、盆山边界不清, 盆山为渐变过渡关系, 其盆山耦合关系主要受控于邻区(盆外)的构造变形和盆内沉积盖层中多层次滑脱作用。不同盆山结构主要通过对比现今四川盆地保存条件的控制而控制现今油气分布。四川盆地现今(残存)大中型油气藏和天然气探明储量的大部分主要分布于突变型盆山结构区, 尤其是秦岭构造变形控制域。

关键词 盆山结构; 盆山耦合; 油气分布; 四川盆地

中图法分类号 P544

* 本文受国家自然科学基金项目(40739907、40802049)资助。

第一作者简介: 刘树根, 男, 1964年生, 博士, 教授, 石油地质学和构造地质学专业, E-mail: lsg@cdu.edu.cn

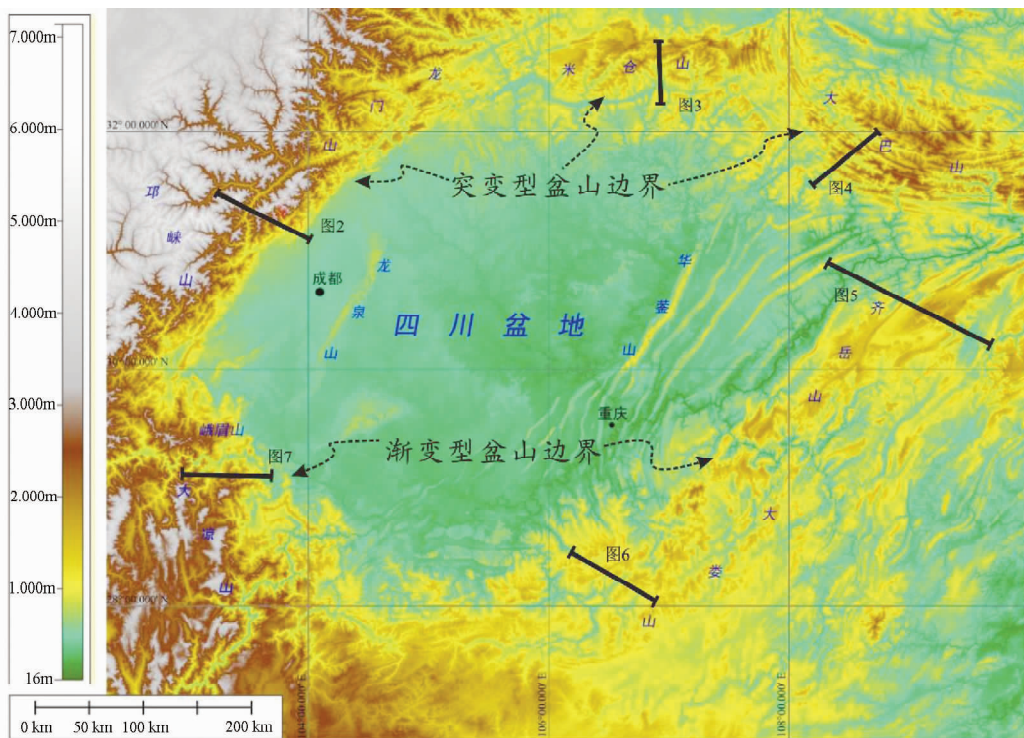


图1 四川盆地周缘盆山结构及其区域数字地貌图

Fig.1 Digital elevation map (DEM) and textures of Sichuan basin and its surrounding orogenic belts

1 引言

大陆造山带与沉积盆地之间具有十分密切的内在成因联系,岩石圈深部过程、近地表构造与气候之间具有典型互馈机制 (Cloethigh *et al.*, 2009)。沉积盆地和造山带作为大陆构造的两个基本单元,它们形成于统一的地球动力学系统之中,在空间上相互依存、物质上相互补偿、演化上相互转化、动力上相互转换,具有盆转山、山控盆、盆定山的时空耦合过程 (李德威, 1995; 刘树根等, 2003a; 吴根耀和马力, 2004; 刘少锋和张国伟, 2005), 盆山耦合研究逐步成为当前大陆动力学研究的热点和前沿领域 (刘树根等, 2003b; 张国伟等, 2006; 李德威等, 2009)。

盆山结构及其耦合关系宏观上控制了相邻盆地的结构和演化过程 (王清晨和李忠, 2003; 刘树根等, 2003c, 2005; 沈传波等, 2007a), 是导致盆地内油气差异成藏、金属成矿的原因之一。四川盆地及其周缘造山带是一个典型复合盆山体系。现今四川盆地既是沉积盆地和构造盆地, 又是地貌盆地, 具有较为清晰的边界 (图 1)。然而, 现今四川盆地边界 (盆山结构) 有突变 (线型) 和渐变 (弥散型) 两种。其西边界 (龙门山) 和北边界 (米仓山和大巴山) 是线型突变边界, 也是扬子地块 (板块) 的边界, 边界的几何形状和扬子板块的刚性对构造的走向和特征有较大的控制作用; 四川盆地的东边界和南边界是渐变弥散型边界, 是板 (陆) 块内部的边界 (图 1)。现今发现的大中型油气田和探明储量多分布在盆地的

北部 (即线型突变盆山边界前缘) (王庭斌, 2005; 邓宾等, 2009a), 暗示盆山结构和耦合关系的不同类型对盆地内油气的分布有较大的控制作用。本文据我们对四川盆地周缘造山带 (龙门山、米仓山、大巴山等) (刘树根, 1993; 刘树根等, 2006, 2009) 和四川盆地油气分布的多年研究 (刘树根等, 2008a, b), 在充分论述四川盆地及其周缘造山带的盆山结构和耦合关系及其特征的基础上, 探讨盆地油气的分布与盆山结构类型的内在联系, 揭示油气分布的规律及其主控因素, 供四川盆地和我国西部沉积盆地油气地质研究和勘探参考。

2 盆山结构类型及特征

四川盆地地处扬子板块西缘, 其盆山结构主要由四川盆地及其周缘的龙门山、米仓山-大巴山、齐岳山和大凉山及大凉山组成 (图 1)。盆地与造山带之间具有多期多样的构造转换过程和复合联合关系, 形成一个有机联系的复合盆山体系。

2.1 板缘突变型盆山结构

2.1.1 龙门山与川西前陆盆地

龙门山造山带界定了四川盆地的西界, 也是扬子板块的西缘。它北起广元, 南至天全, 长约 500km, 宽约 30km, 呈北东-南西向展布, 北东与米仓山相交, 南西被鲜水河断裂相截。前山带 (前陆滑脱拆离带) 平均海拔高度在 800 ~

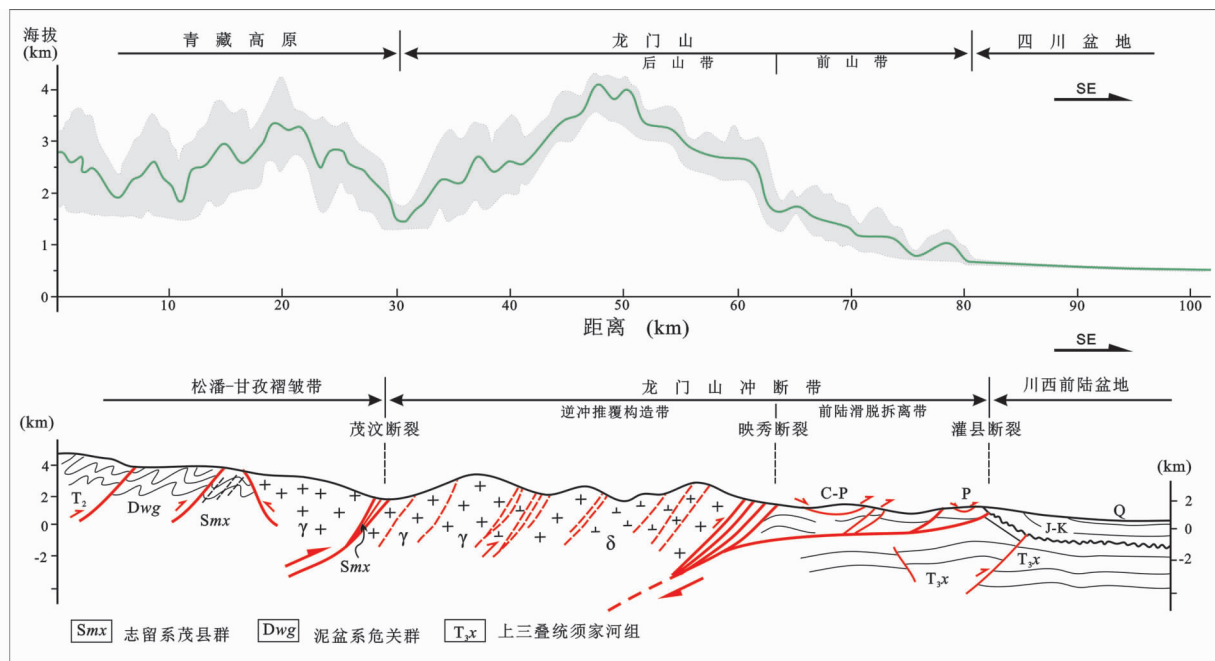


图2 龙门山-川西前陆盆地突变型盆山结构地貌数字高程(DEM)(上)及结构剖面图(下)

Fig.2 DEM (upper) and linearly abrupt texture profile (below) of Mount Longmen and West Sichuan foreland basin

2000m,后山带(逆冲推覆构造带)平均在2000~3500m之间,最高峰在5000m左右,山前川西前陆盆地至川中地区平均高程为400~600m,仅龙泉山地区和剑阁-广元一带高约800m左右,山盆反差极大,盆山边界明晰,形成典型的山-盆地地貌(图2)。龙门山与山前前陆盆地的高差大于2000m,地形坡度变化的宽度仅为15~30km,是环青藏高原边缘山脉中坡度变化最大的地区(Clark *et al.*, 2004),且龙门山南段的海拔明显高于北段,因此从龙门山南段过渡到四川盆地的地形梯度最大,导致南端盆山界限(相对于北段)显著(图1)。

龙门山-川西板缘突变型盆山结构是扬子陆块向北漂移过程中产生的北西向推挤力、源自秦岭造山带的南北向推挤力和源自青藏高原的东西向推挤力三者联合作用的结果(刘树根等,2003b,2009)。龙门山与川西前陆盆地具有明显不同的深部岩石圈结构特征,从东向西上地幔及莫霍面深度逐步加深,岩石圈各层厚度逐步增厚,尤其是壳内高导层在龙门山主体构造带上缺失,但却存在下地壳高阻异常体(刘树根,1993)。倾向上,沿主干断裂(茂汶-汶川断裂、北川-映秀断裂、安县-灌县断裂)由北西向南东发生前展式逆冲推覆构造变形过程,由北西向南东具有变形层次渐浅、强度递减、卷入层位变新的趋势(林茂炳等,1996;林茂炳和吴山,1991;刘和甫等,1994)。走向上,龙门山造山带呈现北、中、南段三分格局,它们在基底性质及展布、地层发育及演化历史、变形特征、沉降与隆升特征、活动构造等多个方面具有差异(邓康龄,2007;李智武等,2008;刘树根等,2009)。印支期,龙门山中北段活动较强,由北东向南西逐渐扩展,主要为挤压逆

冲和左旋走滑作用(刘树根,1993;林茂炳等,1996;刘树根等,2009),盆山结构基本奠定;燕山期,构造活动总体上趋于相对平静,具有南北分段、由北东向南西迁移的特征;喜马拉雅山期,龙门山中南段活动较强,由南西向北东逐渐扩展和递进,主要为挤压逆冲、隆升和右旋走滑作用(何鲤等,2007;李智武等,2008;刘树根等,2009)。

2.1.2 米仓山与川北前陆盆地

米仓山西起四川广元,东至陕西西乡,长约150km,宽约50km,呈近东西向展布,连接龙门山与大巴山,形成四川盆地的北部边界(图1)。米仓山平均海拔高度在1000~2000m,最高峰约为2500m,山前拗陷为川北前陆盆地,平均高程为400~800m(图3),仅通南巴背斜区高程较高,为900m左右。米仓山与山前前陆盆地落差大于1000m,山前陡变带宽约15km,盆山界线坡度较陡,地貌反差较大,盆山线性边界明晰。

米仓山隆起带受扬子北缘板块深俯冲动力作用控制,岩石圈厚度向北急剧增厚(自80~100km增厚至125km),造成岩石圈应变物质分别向东与向西侧走滑挤出以及垂向挤出与抬升(程顺有等,2003),致使汉南-米仓山逆冲叠置隆起,前缘多层次推覆滑脱形成米仓山-川北前陆盆地突变型盆山结构(魏显贵等,1997;吴德超等,1998)。构造变形沿造山带向前陆盆地方向逐渐减弱,具有显著的南北分带性和东西分段性,自北而南可概括划分为米仓山隆起带与川北前陆盆地两个单元,隆起带具褶皱冲断和滑脱推覆多期变形特征,而盆内为弱构造变形(图3)。走向上由西向东变形强度、缩短量变小,变形时间变晚,具分段性(吴世祥等,2006)。同时,

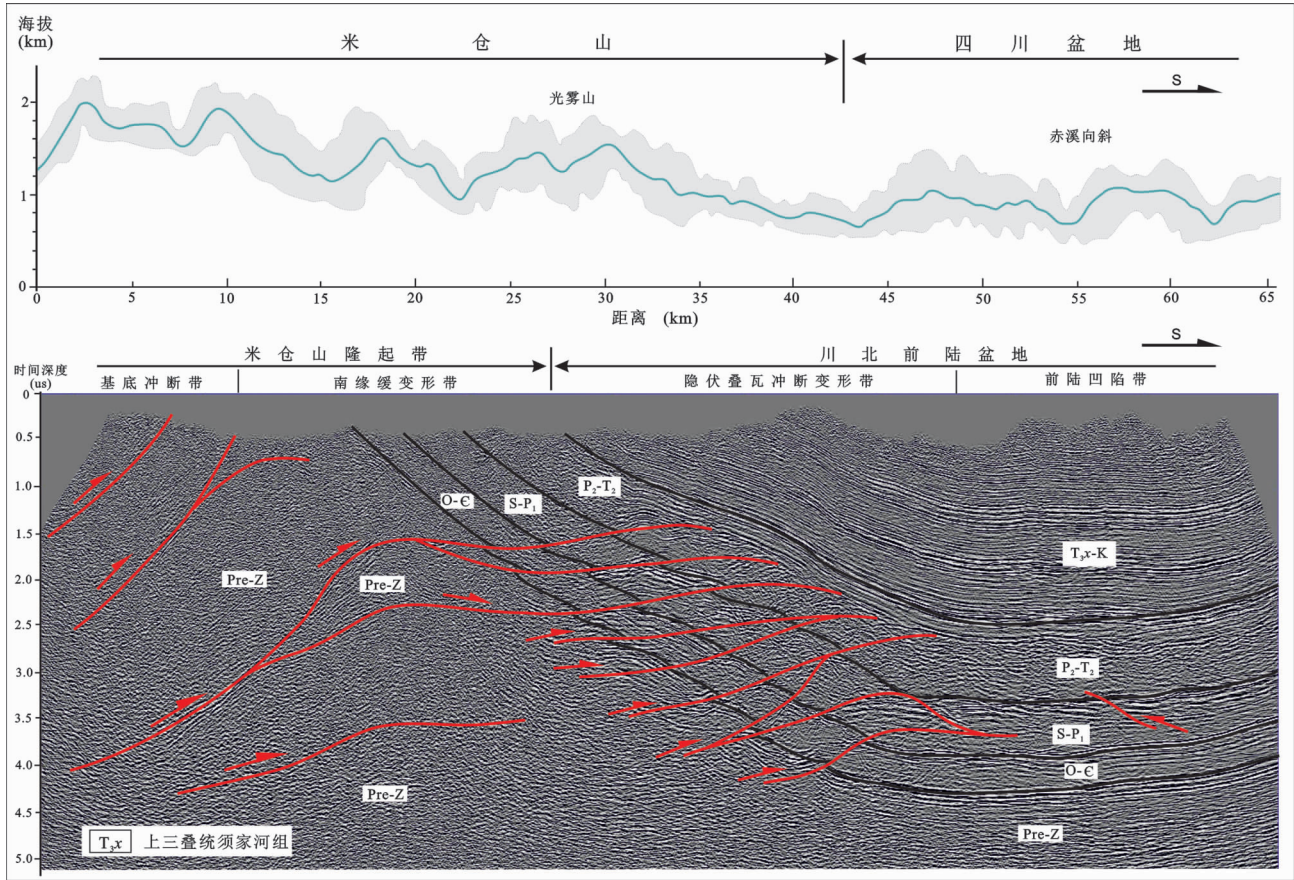


图3 米仓山-川北前陆盆地突变型盆山结构地貌数字高程(DEM)(上)及结构剖面图(下)

结构剖面为地震测线 TNB-NW-03-148

Fig. 3 DEM (upper) and linearly abrupt texture profile (below) of Mount Micang and North Sichuan foreland basin

The seismic line of TNB-NW-03-148

构造变形在纵向上也具有明显的层次性(以区域滑脱层为界),野外观察表明结晶基底与沉积盖层具有明显的变形差异,结晶基底多期叠加变形作用强烈,沉积盖层普遍变形微弱,在米仓山隆起带构造样式以箱状背斜为主,而盆内则以单斜为主。受造山带叠瓦冲断加载,盆内发生负载挠曲,形成川北前陆盆地,沉积巨厚的陆相地层。米仓山可能以隆升作用为主,其冲断推覆作用相对较弱(李岩峰等,2008)。

晚三叠世扬子板块北缘向北深俯冲,导致发生大规模逆冲推覆,汉南-米仓山隆起的主体构造也于该期奠定(魏显贵等,1997),其前缘沉积巨厚上三叠统须家河组磨拉石和侏罗系红层,它们在米仓山南北部地层具有较好的对比性,但白垩系仅分布于米仓山隆起南侧,说明汉南隆起和米仓山隆起分别形成于印支晚期和燕山期,具有前展式变形发展过程。它们是在印支期碰撞造山作用基础上,叠加燕山中晚期(J_3-K_1)陆内造山作用(施炜等,2007;裴先治等,2009)形成的板缘突变型盆山结构。

2.1.3 大巴山与川东北前陆盆地

盆地东北边界大巴山构造带位于上扬子地块北缘,现今

四川盆地与秦岭造山带的过渡部位,西与米仓山相连,东端止于神农架基底隆起。大巴山构造带长约300km,宽约45km,呈北西-南东向弧形展布,平均海拔高度在1000~2500m,最高峰约4000m左右,山前的盆地高程为600~1000m,从盆内600m高程逐渐递增至山前近1000m左右高程,造山带与山前盆地高差大约1000m,山前陡变带宽约10km,山盆地貌对比明显,盆山边界较清晰,形成盆地东北缘山-盆地地貌(图4)。

大巴山与川东北前陆盆地突变型盆山结构,是扬子陆块自南向北的低角度长距离陆内俯冲深部背景下、南秦岭中上地壳自北向南前展式滑脱与逆冲推覆扩展变形而形成(刘树根等,2006)。由南西向北东,莫霍面界面、岩石圈和软流圈界面逐渐呈台阶状增加(张国伟等,2001)。基底和盖层间以及盖层内部多个滑脱层为由深至浅的滑脱、冲断构造变形提供了物质条件。倾向上沿边界主断裂城口断裂及镇巴-平坝断裂、鸡鸣寺断裂、铁溪-巫溪断裂,可分为变形强度、样式等具明显区别的叠瓦断层带、断层-褶皱带、滑脱褶皱带、川东北前陆变形带(或川东北前陆盆地)(汪泽成等,2006;刘树根等,2006;董云鹏等,2008)。

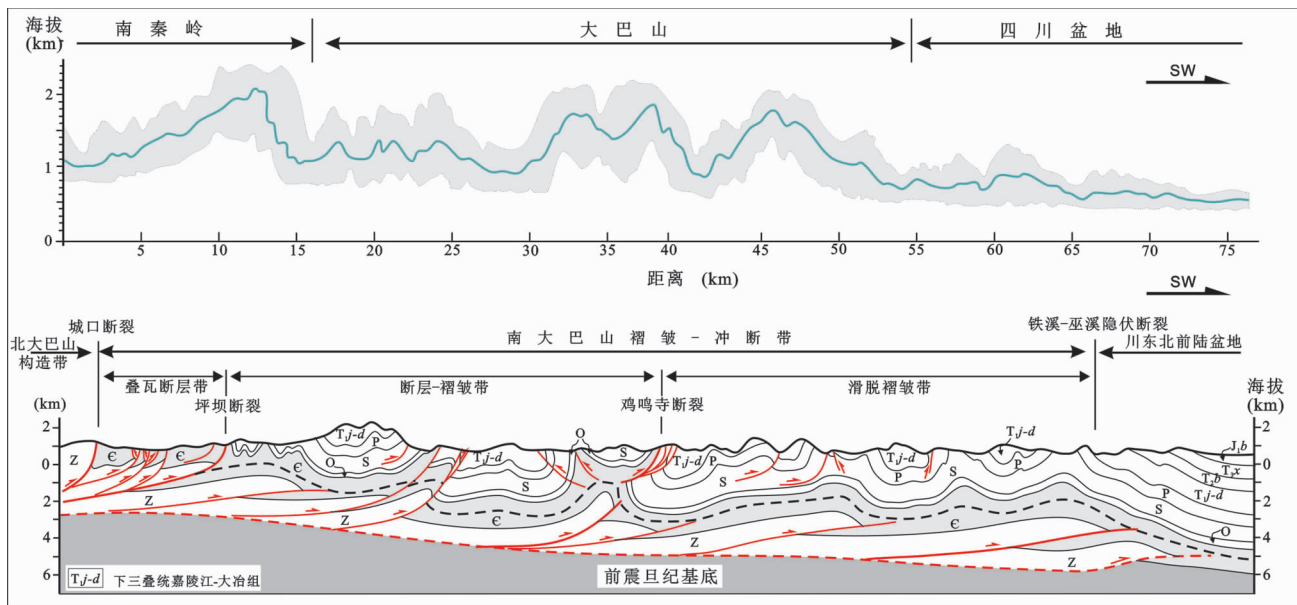


图4 大巴山-川东北前陆盆地突变型盆山结构地貌数字高程(DEM)(上)及结构剖面图(下)

Fig.4 DEM (upper) and linearly abrupt texture profile (below) of Mount Daba and northeastern Sichuan foreland basin

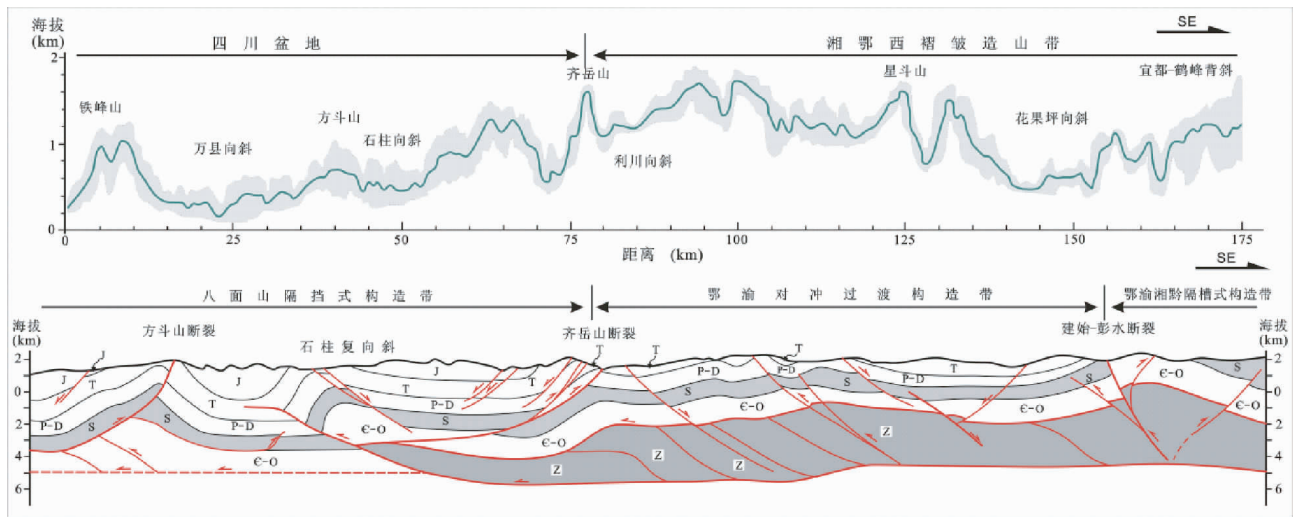


图5 齐岳山-川东高陡构造区渐变型盆山结构地貌数字高程(DEM)(上)及结构剖面图(下)(结构构造剖面据马力等,2004; Yan et al., 2005; 四川省地质局, 1981^{①②③}; 湖北省地质矿产局, 1987)

Fig.5 DEM (upper) and diffusely gradual texture (below) of Mount Qiyue and East Sichuan basin (the profile is compiled from Ma et al., 2004; Yan et al., 2005; BGMRH, 1987)

北大巴山主要是印支期碰撞造山作用和燕山期陆内逆冲推覆作用叠加改造的结果,南大巴山则主要是中晚燕山期(J_3-K_1)递进变形过程中的产物(董云鹏等,2008;胡健民等,2009)。受盆缘造山带前展式扩展变形作用控制,盆内北部

及东北部下白垩统与下伏上侏罗统两者普遍为角度不整合或平行不整合接触关系,预示着早白垩世末期盆地北缘突变型盆山结构(米仓山-川北前陆盆山结构和大巴山-川东北前陆盆山结构)最终定型。

① 四川省地质局. 1981a. 万县幅 1:20 万区域地质图
 ② 四川省地质局. 1981b. 忠县幅 1:20 万区域地质图
 ③ 四川省地质局. 1981c. 奉节幅 1:20 万区域地质图

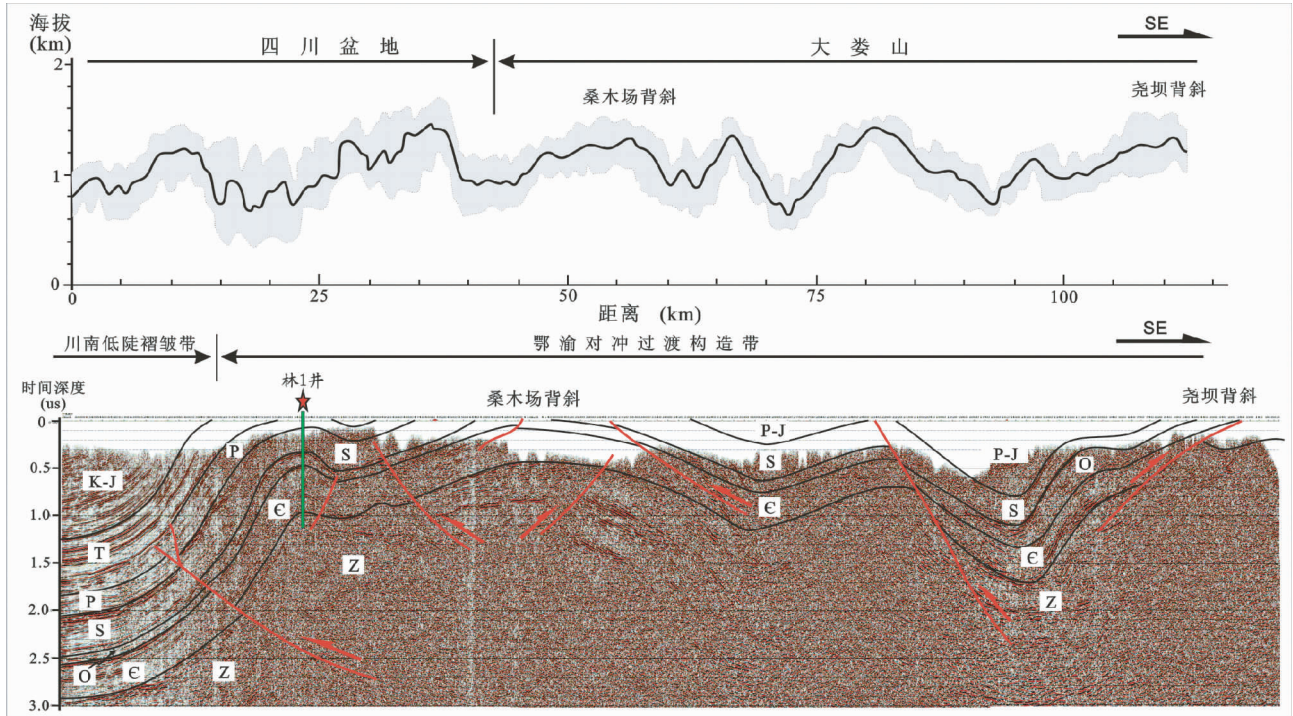


图6 大娄山-川西南褶皱区渐变型盆山结构地貌数字高程(DEM)(上)及结构剖面图(下)

结构剖面为地震测线 TTbli-04-608

Fig. 6 DEM (upper) and diffusely gradual texture (below) of Mount Dalou and Southwest Sichuan basin

The seismic line of TTbli-04-608

2.2 板内渐变型盆山结构

2.2.1 齐岳山与川东高陡构造区

盆地东缘齐岳山构造带北东接大巴山弧形构造带,南西连大娄山构造带,宽约35km,NE走向,长约350km,平均海拔高度在1000~1800m,最高峰约2000m左右,山前的盆地最低高程为400~1000m(图5)。造山带与山前盆地的高差大约400~600m,盆山地貌特征相似、边界不清晰,不存在典型山前陡变带,且由北东向南西盆缘山-盆海拔高程差逐渐减弱。

盆地东缘边界齐岳山构造带,由一系列NE-NNE向延伸的高陡背斜组成,其背斜带核部常为逆冲断裂由SE向NW冲断,为川东八面山隔挡式构造带与鄂渝湘黔隔槽式构造带的过渡带(鄂渝对冲过渡构造带),其两侧沉积建造、构造变形等特征具有一定差异,从而成为四川盆地东部板内渐变型盆山边界,但其两侧深部岩石圈结构大致相同(王懋基,1994;周江羽等,1997)。该渐变型盆山结构形成于华南大陆板内扬子与华夏两陆块印支-燕山期造山拼合的陆内构造运动过程中,由东向西穿时扩展的逆冲构造变形与多层次滑脱(下寒武统、下志留统)作用形成的(金宠等,2009)。

2.2.2 大娄山与川南褶皱区

盆地南缘大娄山构造带长约250km,宽约80km,NEE~

NE走向,平均海拔高度在1000~1800m,最高峰约2000m左右,山前的盆地最低高程为600~1400m(图6),至盆内泸州一带海拔高程逐渐降低至400m左右;盆缘造山带与其山前盆地的高差大致相当,盆山地貌特征总体相似(主要为高山与深切沟谷)、边界不清晰,不存在典型山前陡变带。

四川盆地东南缘大娄山与川南褶皱区具有相似的深部岩石圈结构特征(四川省地质矿产局,1991)。盆内东缘下白垩统普遍缺失,仅黄金口背斜东侧下白垩统与其下伏的侏罗系整合接触且一同卷入川东东北向褶皱,说明川东隔挡式褶皱带形成于早白垩世末。这与盆内达州-开县地区磷灰石热年代学反演的晚白垩世隆升剥蚀期(沈传波等,2007b;邱楠生等,2008)大体一致。相反,盆地南缘川南合江-习水一带上下白垩统成整合接触关系,一同卷入川南东西向和南北向复合联合变形体系,预示着川南褶皱区可能始于晚白垩世末-喜马拉雅早期,最终定型于喜马拉雅期(邓宾等,2009a, b)。这与盆缘习水地区磷灰石热年代学反演的晚白垩世末隆升剥蚀期大体一致。

2.2.3 大凉山与川西南低陡褶皱区

大凉山北起四川雅安,南至云南昭通一带,长约300km,宽约40km,呈近南北向展布,北接龙门山形成四川盆地的西部边界。大凉山平均海拔高度在1000~3500m,最高峰约为4000m,山前川西南盆地平均高程为400~800m。大凉山整体与山前川西南盆地落差大于1000m,至盆缘落差逐渐降低

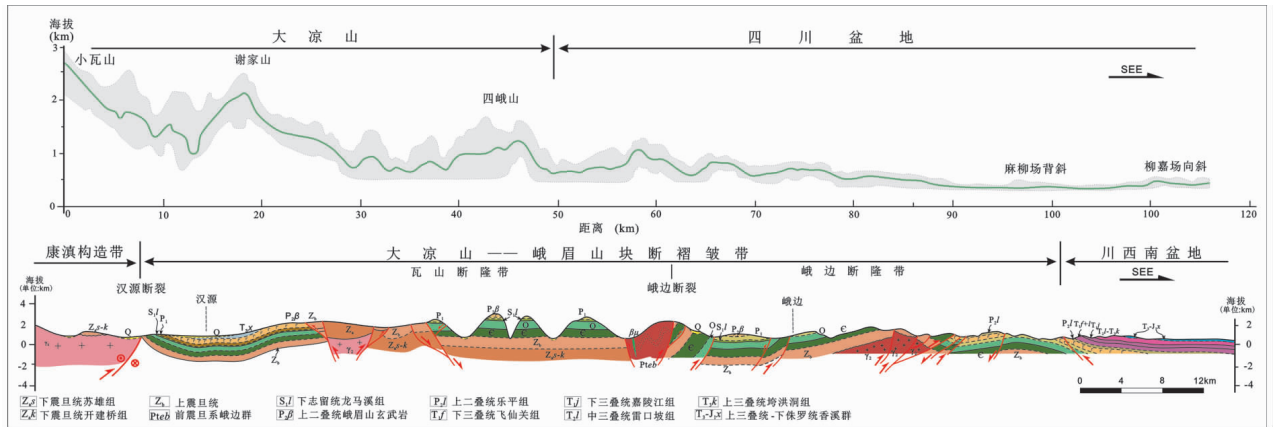


图7 大凉山-川西南褶皱区渐变型盆地结构地貌数字高程(DEM)(上)及结构剖面图(下)

Fig.7 DEM (upper) and diffuse structure (below) of Mount Daliang and Southwest Sichuan basin

表1 典型突变型与渐变型盆地结构特征对比表

Table 1 The basic features of linearly abrupt texture and diffusely gradual texture of sedimentary basin and orogenic belt system

类别	突变型盆地结构	渐变型盆地结构
地貌特征	山-盆地地貌反差大、地形坡度陡、盆山边界明晰	山-盆地地貌反差小、盆山边界不明晰
动力学机制	板缘地壳俯冲碰撞	邻区(盆外)的构造变形和盆内沉积盖层多层次滑脱
结构特征	盆山深部岩石圈结构具差异性,浅部具冲断带-前陆盆地二元结构	盆山深部岩石圈结构相似,不具有邻近冲断造山带的前陆盆地(拗陷)
构造特征	以边界主断裂控制、具典型分带性,岩层缩短以逆冲叠覆为主	具过渡性、分带性,岩层缩短以(滑脱)褶皱缩短为主
隆升与沉降特征	造山带隆升与前陆盆地沉降具有同步性和镜像关系	山脉隆升与盆地隆升呈一致性
油气分布特征	油气保存条件较好,圈闭油气充满度较高,大中型油气田分布频率较大	油气保存条件较差,圈闭油气充满度较低,大中型油气田分布频率较低

为小于 500m(图 7),不存在典型山前陡变带,山-盆地地貌反差 不明显,盆山边界不明晰,为渐变型过渡(图 1)。

盆地西南缘边界大凉山-峨眉山构造带,由一系列南北 或北北西方向右阶雁列主断裂与断块组成,为扬子西缘康滇 古隆起与四川盆地的连接带。大凉山与川西南低陡褶皱区 深部岩石圈结构特征变化不大,从宜宾一带至西昌盆地上地 幔及莫霍面深度对比变化甚弱(李立,1997;崔作舟等, 1987)。大凉山构造带总体构造变形微弱,岩层普遍近水平 或低角度缓倾(图 7)。大凉山-川西南低陡褶皱带渐变型盆 地结构受控于扬子板块西缘(边界)主断裂强烈走滑变形作 用,缺乏典型褶皱冲断带与前陆盆地二元结构(图 7)。但盆 缘差异隆升剥蚀作用强,形成大量深切沟谷、断块山地貌,而 区别于川西南盆地平原地貌。

前新生代四川盆地西南缘、西昌-会东盆地以及楚雄盆 地等可能为一个统一的沉积盆地(四川省地质矿产局, 1991)。中晚新生代四川盆地西南缘受特提斯域构造影响发 生大规模走滑变形构造运动,受盆缘主走滑断裂控制,如鲜 水河断裂、小金断裂、安宁河断裂等,在盆地西南缘形成大渡 河背斜、牛栏江背斜(王二七和尹纪云,2009)以及大量走滑

断块,致使川西南缘断隆剥蚀成山(An *et al.*, 2008)。

3 突变型和渐变型盆地结构特征对比

四川盆地与周缘造山带均以褶皱冲断带相连,为挤压型 盆地结构,构造变形在平面上和纵向上具有明显的分带性和 层次性,其盆地结构有板缘突变型和板内渐变型两类。板缘 突变型盆地结构受板缘刚性边界及深大断裂系控制,盆地边 界明确,盆地与造山带为突变关系,现今地貌反差大,地形坡 度陡,其盆地耦合关系主要受控于深部结构的差异性和造山 带的形成演化过程。其浅部构造为典型的冲断带(山)和前 陆盆地(盆)二元结构(表 1),二者在构造、沉积和深部结构 上形成相互联系不可分割的统一体,如:龙门山冲断带-川西 前陆盆地、大巴山冲断带-川东北前陆盆地(表 2)。板内渐变 型盆地结构受板内弥散性构造变形控制,盆地边界不明确, 盆地与造山带为渐变过渡关系,现今地貌反差小,地形坡度 缓。两者的深部结构构造相似,其盆地耦合关系主要受控于 邻区(盆外)的构造变形和盆内沉积盖层中滑脱层的分布特 征。其浅部构造主要为大范围的盖层滑脱构造,如:齐岳山 与川东高陡构造区、大娄山与川西南褶皱区(表 2)。

表2 四川盆地周缘盆山结构特征对比表

Table 2 The geological features of sedimentary basin and orogenic belt systems in Sichuan basin and its surrounding orogenic belts

分类	结构单元	地貌特征	结构-构造特征	定型时期
突变型盆山结构	龙门山-川西前陆盆地	山盆地貌反差极大,地形坡度极陡,盆山界线明晰	盆山深部岩石圈结构具差异性,浅部具龙门山冲断带-川西前陆盆地二元结构,构造分带性、分层性明显,造山带隆升剥蚀与盆地沉降充填具有典型耦合效应	印支末期-喜马拉雅期
	米仓山-川北前陆盆地	山盆地貌反差极大,地形坡度极陡,盆山界线明晰	盆山深部岩石圈结构具差异性,浅部具米仓山冲断带-川北前陆盆地二元结构,构造分带性、分层性明显	印支末期-燕山中晚期
	大巴山-川东北前陆盆地	山盆地貌反差大,地形坡度陡,盆山界线较明晰	盆山深部岩石圈结构具有差异性,浅部具大巴山冲断带-川东北前陆盆地二元结构,构造分带性、分层性明显,造山带隆升剥蚀与盆地沉降充填具有耦合效应	印支末期-燕山晚期
渐变型盆山结构	齐岳山-川东高陡构造区	山盆地貌反差较小,盆山界线模糊,缺少山前陡变带	盆山深部岩石圈结构相似,受控于板内雪峰陆内造山过程由东向西穿时扩展多层次滑脱变形挤压,区域滑脱形成“侏罗山式”褶皱,盆山构造变形特征差异较小,具渐变型分带特征	燕山晚期
	大娄山-川西南褶皱区	山盆地貌反差极小,盆山界线不清,缺少山前陡变带	盆山深部岩石圈结构相似,受控于板内雪峰陆内造山过程由东向西穿时扩展多层次滑脱变形挤压,区域滑脱形成“侏罗山式”褶皱,盆山构造变形特征对比差异明显	燕山晚期-喜马拉雅早期
	大凉山-川西南褶皱区	山盆地貌反差小,盆山界线不清,缺少山前陡变带	盆山深部岩石圈结构相似,受控于扬子板块西缘断裂强烈走滑构造作用,盆山构造变形特征对比不明显	喜马拉雅中晚期

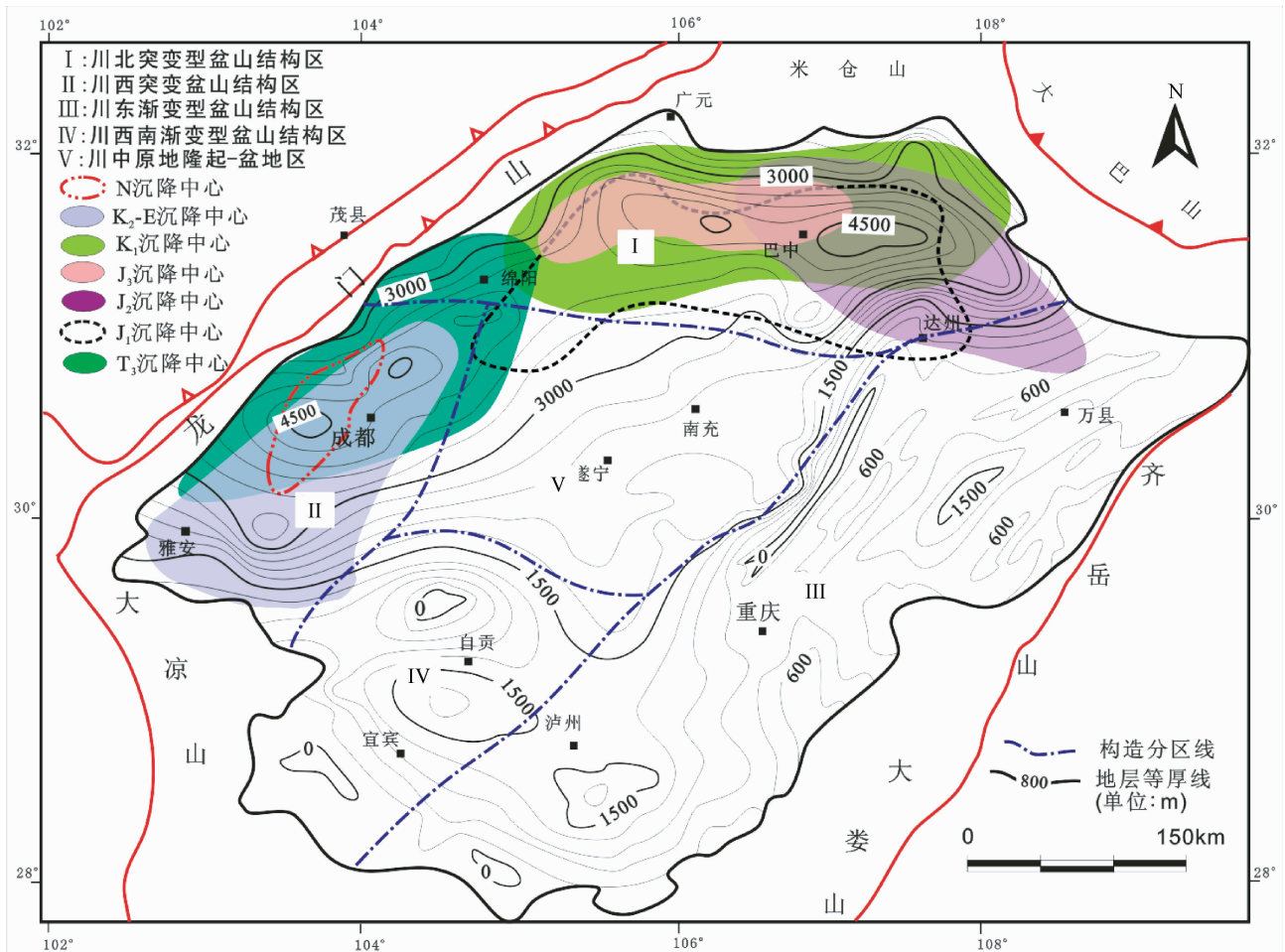


图8 四川盆地陆相沉降中心及其残留地层等厚度图

Fig. 8 The thickness and subsidence centers of terrestrial strata in Sichuan basin

表3 四川盆地大中型油气田分布基本特征对比表(截止2009年底,含部分小于100亿气田)

Table 3 The basic features of the large- and medium-sized gas fields in Sichuan basin (at the end of 2009)

规模	位置	气田名称	探明储量 ($\times 10^8 \text{m}^3$)	主要产层	烃源岩	储层岩性	探明储量比(%)		占盆地总探 明储量比(%)
							海相	陆相	
大型 气田	川东渐变 型盆山结 构区	五百梯	409	C_2hl	S_1lm	白云岩	3.48		2.43
		沙坪场	397.71	C_2hl	S_1lm	白云岩	3.38		2.36
		卧龙河	380.52	C_2hl 、 T_{1j}	S_1lm	白云岩	3.23		2.26
	川中原地 隆起区	广安	1351.01	T_3x^4 、 T_3x^6	T_3x^1 、 T_3x^3	砂岩		26.63	8.02
		八角场	341.12	T_3x^4	T_3x	砂岩		6.72	2.03
		磨溪	676.06	T_{1j} 、 T_2l	T_3x^3 、 P_2l	灰岩、白云岩		5.75	4.02
	川西突变盆 山结构区	威远	408.61	Z_2dn	下寒武统	白云岩		3.47	2.43
		新场	723.57	J_2s 、 J_3p 、 T_3x^2	T_3x	砂岩		14.26	4.30
		洛带	323.83	J_3sn 、 J_2s	T_3x^1 、 T_3x^3	砂岩		6.38	1.92
	川北突变 型盆山结 构区	罗家寨	581.08	T_1f	P_2l 、 S_1lm	灰岩、白云化灰岩		4.94	3.45
		普光	4050.79	T_{1j} 、 T_1f 、 P_2	P_2l 、 S_1lm	生物灰岩、白云岩		34.43	24.06
		铁山坡	373.97	T_1f	P_2l 、 S_1lm	灰岩、白云岩化灰岩		3.18	2.22
		渡口河	359	T_1f	P_2l 、 S_1lm	灰岩、白云岩化灰岩		3.05	2.13
		元坝	510.29	P_2c	P_2l 、 S_1lm	生物灰岩、白云岩		4.34	3.03
	小计						69.25	53.99	64.66
中型 气田	川东渐变盆 山结构区	大池干	258.71	C_2hl	S_1lm	白云岩		2.20	1.54
		龙门	211.62	C_2hl	S_1lm	白云岩		1.80	1.26
		高峰场	139.96	C_2hl	S_1lm	白云岩		1.19	0.83
		西河口	137.9	C_2hl	S_1lm	白云岩		1.17	0.82
		双家坝	129	C_2hl	S_1lm	白云岩		1.10	0.77
		七里峡	113.28	C_2hl	S_1lm	白云岩		0.96	0.67
		福成寨	103.30	C_2hl	S_1lm	白云岩		0.88	0.61
		建南	100.25	T_{1j} 、 T_1f 、 P_2c 、 C_2hl	P_2l 、 S_1lm	生物灰岩、白云岩		0.85	0.60
		沙罐坪	86.3	C_2hl	S_1lm	白云岩		0.73	0.51
	川中原地 隆起区	充西	136.35	T_3x	T_3x	砂岩		2.69	0.81
		黄家场	71.83	T_{1j} 、 P_1m	S_1lm 、 P_1m 、 T_{1j}	白云岩		0.61	0.43
		麻柳场	97.4	T_{1j}	S_1lm	白云岩		0.83	0.58
	川西突变盆 山结构区	白马	268.72	J_3p	T_3x	砂岩		5.30	1.60
		大邑	200	T_3x	T_3x	砂岩		3.94	1.19
		平落坝	165.35	T_3x	T_3x	砂岩		3.26	0.98
邛西		152.68	T_3x	T_3x	砂岩		3.01	0.91	
新都		175.32	J_3sn 、 J_3p	T_3x	砂岩		3.46	1.04	
马井		175.58	J_2s 、 J_3p 、 K	T_3x	砂岩		3.46	1.04	
川北突变盆 山结构区	合兴场	59.69	T_3x	T_3x	砂岩		1.18	0.35	
	七里北	282.21	C_2hl 、 T_1f	P_2l 、 S_1lm	灰岩、白云岩		2.40	1.68	
	铁山	148.47	C_2hl 、 P_2c 、 T_1f	P_2l 、 S_1lm	灰岩、白云岩		1.26	0.88	
	滚子坪	138.97	T_1f	P_2l 、 S_1lm	灰岩、白云岩化灰岩		1.18	0.83	
	中坝	186.3	T_3x^2 、 T_2l	T_3x 、 P_2l	白云岩、砂岩		3.67	1.11	
	黎雅庙	144.09	T_3x	T_3x	砂岩		2.84	0.86	
	马路背	142.0	T_3x	T_3x	砂岩		2.80	0.84	
小计						17.16	35.61	22.74	

4 盆山结构对油气分布的控制作用

盆山结构主要通过通过对现今四川盆地保存条件的影响而控制现今油气的分布。四川盆地现今的区域保存条件又受陆相地层分布和地表隆升剥蚀作用等的控制。

4.1 盆山结构对陆相地层分布的控制

盆地陆相沉积充填演化是盆山关系的综合表征。晚三叠世以来盆地西缘、北缘及东北缘形成冲断带与前陆盆地二元结构,沉积了具巨厚碎屑沉积的川西、川北和川东北前陆盆地,而在盆地南、东缘相应的沉积厚度明显较薄(图8)。盆地晚三叠世以来(残存)陆相碎屑岩总厚度极不均匀,局部

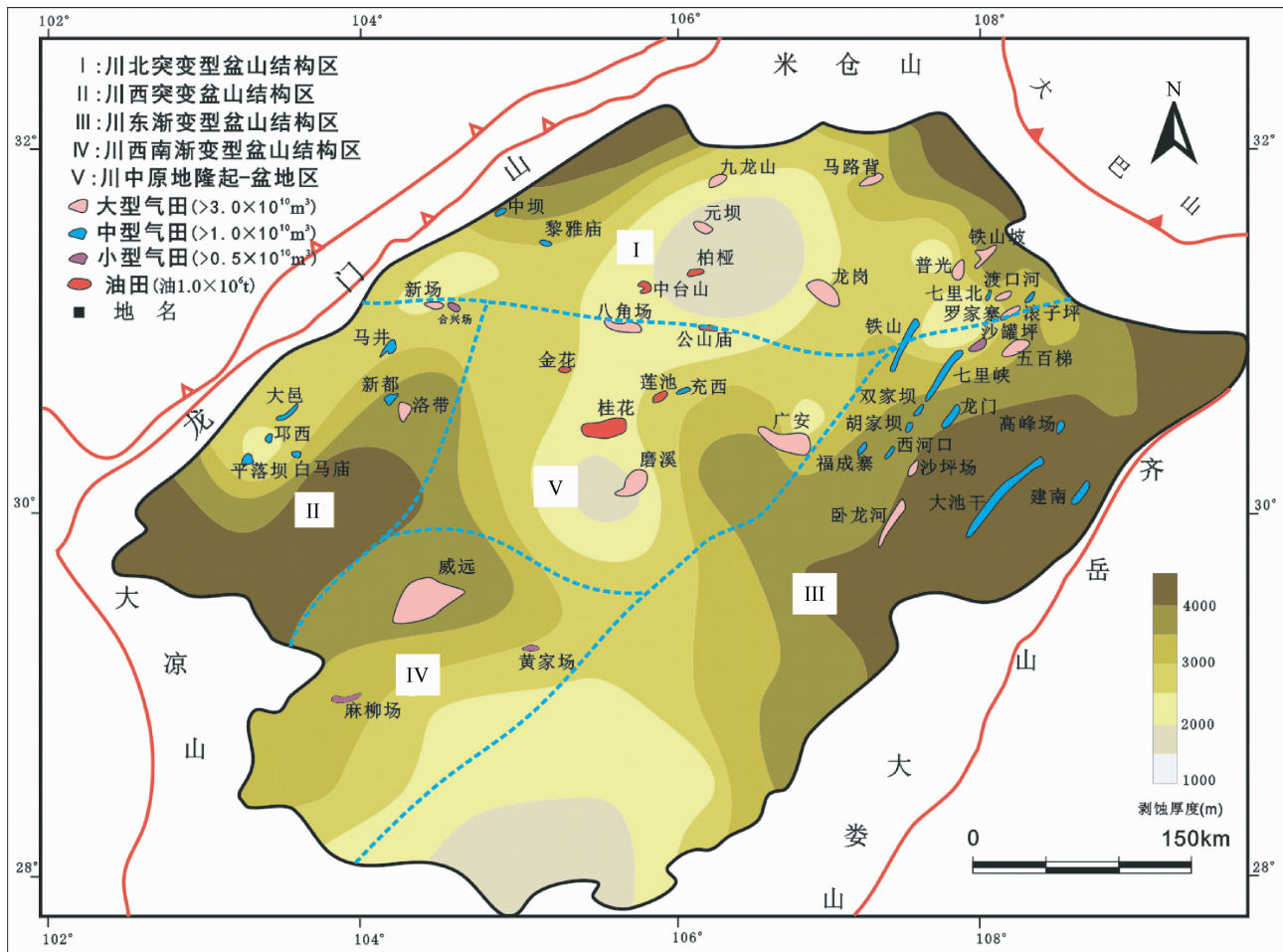


图9 四川盆地晚白垩世以来隆升剥蚀量与大中型气田分布特征图

Fig. 9 The relationship between denudation thickness and the medium-large sized gas fields' distribution in Sichuan basin

可以厚达4500m以上,其最厚沉积地区(大于3000m)主要集中于大邑-成都-绵阳-巴中-通江-达县一带,在盆地南部具有零星沉积充填厚度中心,如赤水、石柱地区。陆相地层展布厚度总体向盆地南部、西南部逐渐减薄,尤其是向西南缘减薄速度加剧,至宜宾西南一带陆相地层剥蚀殆尽。(残存)陆相沉积总厚度与不同时期沉降中心具有明显的叠置效应,而后者明显受冲断带构造活动控制和制约。从厚度分布特征看,龙门山和米仓山突变型盆山结构相对于大巴山突变型盆山结构对陆相沉积充填过程控制影响作用更强。前陆盆地具有巨厚陆相沉积物,不仅对其下伏(Z-T₂)油气提供了极佳的保存条件,而且也形成了新的陆相勘探领域,如川西突变型盆山结构区陆相红层大中型气田探明储量已占盆地天然气总储量13.33%(表3)。

4.2 盆山结构对隆升剥蚀作用的控制

盆地浅部中生界红层为重要的区域性盖层,由于受周缘盆山结构影响,不同区域具有明显不同的构造变形强度、隆升剥蚀幅度、(残留)陆相地层厚度。突变型盆山结构形成过

程中以构建冲断带-前陆盆地二元结构为主,其前缘沉降沉积充填,隆升剥蚀幅度相对较小(图9),盆地西缘及东北缘各突变型盆山结构前缘晚白垩世以来隆升剥蚀量普遍较小(多小于3000m),但是在不同盆山结构过渡带由于受到多个造山带构造活动复合联合作用影响,其隆升剥蚀幅度相对于前陆地区较高,如龙门山与米仓山过渡地区,其晚白垩世以来隆升剥蚀量为3000~4000m,明显大于龙门山或米仓山前陆地区隆升剥蚀量。渐变型盆山结构受邻区(盆外)的浅层多层次滑脱构造和扩展变形影响以隆升剥蚀为主,其晚白垩世以来隆升剥蚀幅度明显大于突变型盆山结构控制变形区域,如川东地区晚白垩世以来剥蚀量普遍大于3500m,尤其是在大凉山渐变型盆山结构和龙门山突变型盆山结构过渡区也产生了强烈的隆升剥蚀作用,但是大娄山渐变型盆山结构区却具有相对较低的隆升剥蚀量。晚白垩世以来剥蚀厚度小的地区(<3500m)和剥蚀厚度大的地区(>3500m)大中型油气田分布频率和油气藏储量丰度有显著差异(图9)。

4.3 盆山结构对油气分布的控制作用

四川盆地是我国南方最大的含油气盆地,也是我国典型

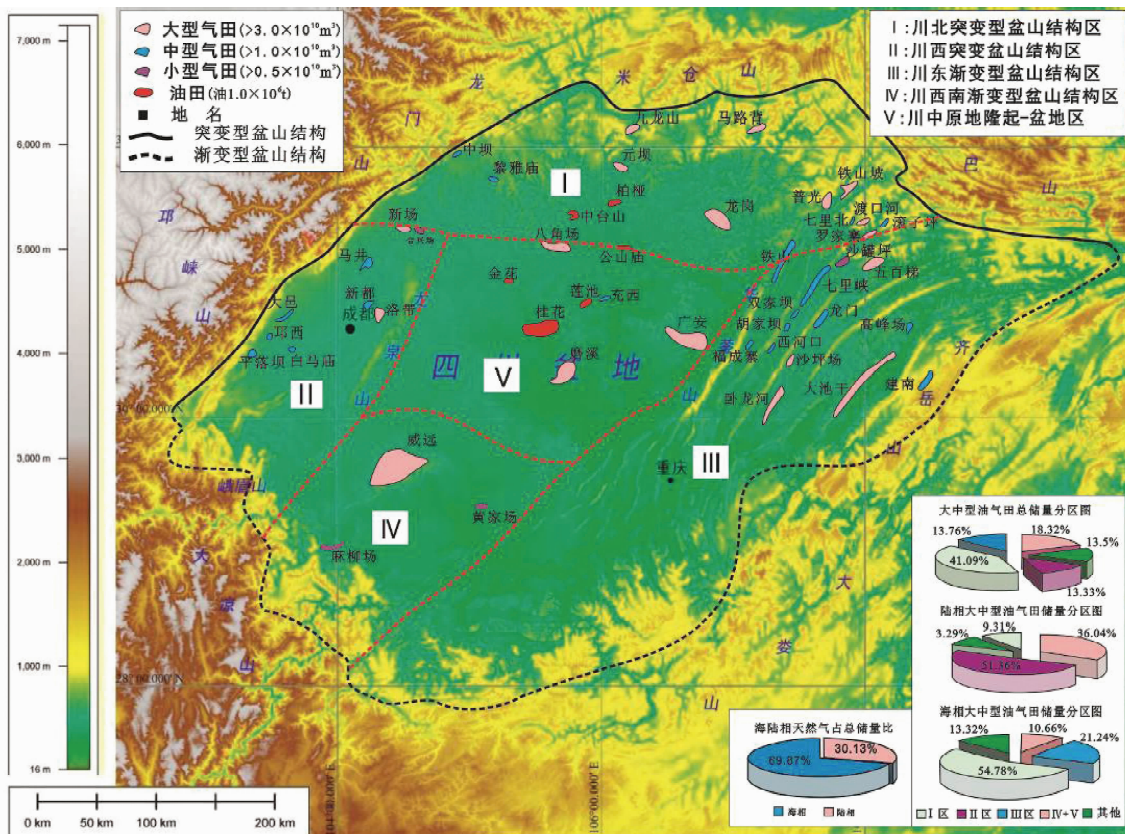


图 10 四川盆地盆山边界类型和大中型油气田分布图

Fig. 10 The texture areas of sedimentary basin and orogenic belt system and the medium-large sized gas/oil fields' distribution in Sichuan basin

的叠合盆地,具有悠久的油气勘探历史,至今发现含气层位 20 多个、气田 173 个、油田 13 个(刘树根等,2008)。盆内现今大中型油气田(探明储量 $100 \times 10^8 \text{m}^3$)共 35 个,其中海相大中型气田 22 个、陆相大中型气田 13 个(图 10),探明储量占盆地天然气总储量 87.4%,其中大型和中型油气田探明储量分别占总储量的 64.7% 和 22.7% (表 3)。四川盆地现今大中型油气田分布在受 3 大突变型盆山边界控制和影响的川北突变型盆山结构区(I区:秦岭构造变形控制域)共 11 个,其中大型油气田 5 个、中型油气田 6 个,6 个含气层位分别为石炭系黄龙组、上二叠统长兴组、下三叠统飞仙关组和嘉陵江组、中三叠统雷口坡组、上三叠统须家河组,以二叠系及下三叠统海相气藏为主(占盆地海相探明总储量的 54.78%),本区探明储量占四川盆地天然气总储量 41.09%,尤其是最近大型龙岗和元坝下三叠统飞仙关组-上二叠统长兴组礁滩气藏及九龙山须二段气藏的发现更预示了该区可喜的勘探前景。川西突变盆山结构区(II区:青藏高原构造变形控制域)现今大中型油气田共 8 个,其中大型油气田 2 个、中型油气田 6 个,5 个含气层位分别为上三叠统须家河组、侏罗系沙溪庙组、蓬莱镇组、遂宁组及白垩系,以须家河组和中上侏罗统陆相气藏为主(占陆相探明总储量的 51.36%),其大中型油气田探明储量占盆地天然气总储量

13.33%。川东渐变型盆山结构区(III区:雪峰构造变形控制域)现今大中型油气田共 11 个,其中大型油气田 3 个、中型油气田 8 个(图 10),4 个含气层位分别为石炭系黄龙组、上二叠统长兴组、下三叠统飞仙关组和嘉陵江组,以石炭系海相气藏为主(占盆地海相探明总储量的 21.24%),探明储量占四川盆地天然气总储量 13.76%。川西南渐变型盆山结构区(IV区:青藏高原构造变形控制域)现今大中型油气田仅为海相威远气田(探明储量 $408.61 \times 10^8 \text{m}^3$),含气层位分别为上震旦统灯影组。因此,把它纳入川中原地隆起-盆地区探明储量统计(图 10)。川中原地隆起-盆地区(V区:基底构造变形控制域)现今大中型油气田最少为 4 个,其中大型油气田 3 个、中型油气田 1 个,3 个含气层位分别为下三叠统嘉陵江组、中三叠统雷口坡组、上三叠统须家河组,以上三叠统须家河组陆相气藏为主(占陆相探明总储量的 36.04%),探明储量占盆地天然气总储量 18.32%。

现今大中型油气田分布特征反映了盆地晚中、新生代隆升剥蚀调整改造后残存油气田的空间分布。地理空间上,现今(残存)大中型油气田主要分布于受盆地北部龙门山、米仓山和大巴山突变型盆山结构控制的山前带(图 10),共 21 个(其中大型油气田和中型油气田分别为 10 个和 11 个),盆地中部有为数较少的大型油气田。盆地南部重庆-泸州-宜宾一

带虽有 40 余个气田,背斜构造几乎都是气田,但却没有一个大中型气田,探明储量大于 $0.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的气田也仅有黄家场和麻柳场气田。实际上,盆地南部和盆缘在地质历史上也形成过巨大的古油田和古气田,它们受后期差异构造隆升作用调整改造、破坏,有些古气藏残存(调整)下来形成现今残余(调整)气藏,如:盆地南部威远气田晚白垩世以来的大规模隆升导致水溶天然气脱溶调整成藏,其侏罗纪古气藏原始裂解气量可达 $10576.39 \times 10^{10} \text{ m}^3$,但晚期天然气成藏率较低,仅为 4.835% (孙玮等,2007)。大巴山前陆盆地普光气田由于晚白垩世以来的隆升作用导致气藏的再富集和定位,形成了我国海相地层中迄今为止发现的最大气田(马永生和蔡勋育,2006),原油裂解天然气晚期成藏率较高,约 75% ~ 85% (Tian *et al.*, 2008)。古油气藏(尤其是盆缘地区)由于剧烈构造隆升作用使保存条件遭到完全破坏,仅残存储层沥青,天然气成藏率为零,如盆地南缘丁山-林滩场古油藏按残存储层沥青计算古油藏规模达 $8.6 \times 10^8 \text{ t}$ (Liu *et al.*, 2010),盆地北缘米仓山古油藏规模更大,达 $2.06 \times 10^{10} \text{ t}$ (代寒松等,2009)。由此可见,历史上四川盆地大范围多存在过油气富集,而现今(残存)大中型气田的空间分布虽有勘探程度的因素,但明显地受盆山结构影响。现今(残存)大中型油气藏主要分布于突变型盆山结构区的前缘地区。突变型盆山边界外(盆外)虽然存在古油气藏,但由于强烈的构造隆升作用,古油气藏遭到完全破坏。渐变型盆山结构控制区,由于大规模隆升剥蚀(其剥蚀量明显高于突变型盆山结构控制区)导致古油气藏后期保存条件和能量场发生较大变化,盆缘由于区域盖层完全剥露,古油气藏遭到完全破坏,盆内古气藏发生晚期调整成藏,但圈闭天然气充满度和成藏效率较低。

5 结论

四川盆地与周缘造山带盆山结构可分为板缘突变型和板内渐变型两类,它们分别为龙门山、米仓山、大巴山突变型盆山结构和齐岳山、大娄山和大凉山渐变型盆山结构。

板缘突变型盆山结构具有显著深部结构构造差异性,浅部构造具典型冲断带(山)和前陆盆地(盆)二元结构,其盆山耦合关系主要受控于深部结构的差异性和造山带的形成演化过程,现今山盆地貌反差大,地形坡度陡,盆山边界明晰。板内渐变型盆山结构,深部结构特征相似,浅部构造具挤压-拗陷结构、不发育大规模冲断推覆,现今山盆地貌反差小、盆山边界不清,为渐变过渡关系,其盆山耦合关系主要受控于邻区(盆外)的构造变形和盆内沉积盖层中多层次滑脱作用。

盆山结构主要通过对现今四川盆地保存条件的影响而控制现今油气的分布。四川盆地现今的区域保存条件受陆相地层分布和地表隆升剥蚀作用等的控制。盆缘突变型盆山结构区较渐变型盆山结构区具有较厚的陆相沉积地层、较

低的隆升剥蚀作用、较弱的构造变形强度和较好的油气保存条件。现今(残存)大中型油气藏和天然气探明储量的大部分主要分布于突变型盆山结构区,尤其是秦岭构造变形控制域(I区)。

References

- An YF, Han ZJ and Wang JL. 2008. Fission track dating of the Cenozoic uplift in Mabian area, southern Sichuan Province, China. *Science in China (Series D)*, 38(5): 555–563
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Hubei Province (BGMHR). 1987. *Enshi 1 : 200000 Geological Map*. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Sichuan Province. 1991. *Regional Geology of Sichuan Province*. Beijing: Geological Publishing House, 1–690 (in Chinese)
- Clark MK, Schoenbohm LM, Royden LH, Whipple KX, Burchfiel BC, Zhang X, Tang W, Wang E and Chen L. 2004. Surface uplift, tectonics, and erosion of eastern Tibet from large-scale drainage patterns. *Tectonics*, 23: 1–20, doi: 10.1029/2002TC001402
- Cloetingh S, Thybo H and Faccenna C. 2009. TOPO-EUROPE: Studying continental topography and Deep Earth-Surface processes in 4D. *Tectonophysics*, 474:4–32
- Cheng SY, Zhang GW and Li L. 2003. Lithospheric electrical structure of the Qinling Orogen and its geodynamic implication. *Chinese Journal of Geophysics*, 46(3): 390–397 (in Chinese with English abstract)
- Cui ZZ, Lu DY, Chen JP, Zhang ZY and Huang LY. 1987. The deep structural and tectonic features of the crust in Panxi area. *Acta Geophysica Sinica*, 30(6): 566–580
- Dai HS, Liu SG, Sun W, Han KY, Luo ZL, Xie ZL and Huang YZ. 2009. Study on characteristics of Sinian-Silurian Bitumen outcrops in the Longmenshan-Micangshan area, Southwest China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 36(6):687–697 (in Chinese with English abstract)
- Deng B, Liu SG, Liu S, Li ZW and Zhao JC. 2009a. Restoration of exhumation thickness and its significance in Sichuan basin, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 36(6):675–687 (in Chinese with English abstract)
- Deng B, Liu SG, Yang S, Zhang ZJ, Huang WM and Song GY. 2009b. Structural characteristics of joints and its implication in the Lingtanchang anticline. *Journal of Mineral. Petrol.*, 29(3): 83–90 (in Chinese with English abstract)
- Deng KL. 2007. Indosinian progressive deformation and its chronogenesis in Longmenshan structural belt. *Oil & Gas Geology*, 28(4): 485–490 (in Chinese with English abstract)
- Dong YP, Zha XF, Fu MQ, Zhang Q, Yang Z and Zhang Y. 2008. Characteristics of the Dabashan fold-thrust nappe structure at the southern margin of the Qingling, China. *Geological Bulletin of China*, 27(9): 1493–1508 (in Chinese with English abstract)
- He L, Liu LP, Luo X, Lu ZZ and Wang YY. 2007. Nappe structure characteristics and exploration potential forecast in Longmenshan, the west of Sichuan Province. *Petroleum Geology & Experiment*, 29(3): 247–252 (in Chinese with English abstract)
- Hu JM, Shi W, Qu HJ, Cheng H, Wu GL and Tian M. 2009. Mesozoic deformation of Dabashan curvilinear structural belt of Qinling Orogen. *Earth Science Frontiers*, 16(3): 49–68 (in Chinese with English abstract)
- Jin C, Li SZ, Wang YJ, Zhang GW, Liu LP and Wang J. 2009. Diachronous and progressive deformation during the Indosinian-Yanshanian movements of Xuefeng mountain intracontinental composite tectonic system. *Oil & Gas Geology*, 30(5): 598–608
- Li DW. 1995. Speculations on continental tectonics. *Earth Science*, 20(1): 1–18 (in Chinese with English abstract)

- Li DW, Xia YP and Xu LG. 2009. Coupling and formation mechanism of continental intraplate basin and orogen: Examples from the Qinghai-Tibet plateau and adjacent basins. *Earth Science Frontiers*, 16(3): 110–119 (in Chinese with English abstract)
- Li L. 1997. The preliminary achievements of magnetotelluric sounding in the study of the crust and upper mantle. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 21(6): 40–467 (in Chinese with English abstract)
- Li YF, Qu GS, Liu S and Zhang H. 2008. Structural characters and mechanism in the Michangshan and southern Dabashan Mountains front. *Geotecnica et Metallogenia*, 32(3): 285–292 (in Chinese with English abstract)
- Li ZW, Liu SG, Chen HD, Liu S, Guo B and Tian XB. 2008. Structural segmentation and zonation and differential deformation across and along the Longmen thrust belt, West Sichuan, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 35(4): 440–454 (in Chinese with English abstract)
- Lin MB and Wu S. 1991. Deformation features of nappe structures in the Longmenshan mountains. *Journal of Chengdu College of Geology*, 18(1): 46–55 (in Chinese with English abstract)
- Lin MB, Gou ZH, Wang GZ, Deng JH, Li Y, Ma YW, Wang DY, Shi SQ, Shi H, Li YZ and Hu XW. 1996. *Geology in the Middle Sector of Longmen Mountains*. Chengdu: Press of Chengdu University of Science and Technology (in Chinese)
- Liu HF, Lian HS, Cai LG and Shen F. 1994. Structural styles of the Longmenshan thrust belt and evolution of the foreland basin in western Sichuan Province, China. *Acta Geologica Sinica*, 68(2): 101–118 (in Chinese with English abstract).
- Liu SF and Zhang GW. 2005. Fundamental ideas, contents and methods in study of basin and mountain relationship. *Earth Science Frontiers*, 12(3): 101–111 (in Chinese with English abstract)
- Liu SG. 1993. *The Formation and Evolution of Longmengshan Thrust Zone and Western Sichuan, China*. Chengdu: Press of Chengdu University of Science and Technology (in Chinese)
- Liu SG, Luo ZL, Zhao XK, Xu GS, Wang GZ and Zhang CJ. 2003a. Coupling relationship 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. *Acta Geologica Sinica*, 77(2): 177–186 (in Chinese with English abstract)
- Liu SG, Luo ZL, Zhao XK, Yue GY, Liu S, Li TB and Song HB. 2003b. Study on the dynamic mode and its simulation in the formation of Longmen mountain-west Sichuan foreland basin system, China. *Petroleum Geology & Experiment*, 25(5): 432–438 (in Chinese with English abstract)
- Liu SG, Xu GS, Li JC, Li GR, Luo ZL and Zhao XK. 2003c. A study on the dynamics of mountain-building, basin-formation and natural gas pool formation in the system of Longmen mountains and west Sichuan foreland basin, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 20(6): 559–566 (in Chinese with English abstract)
- Liu SG, Luo ZL, Zhao XK, Xu GS, Liu S, Wang GZ, Xue GS, Yong ZQ, Li ZW and Sun W. 2005. Discussion on essential characteristics of intracontinental-subduction type foreland basins in western China. *Oil & Gas Geology*, 26(1): 37–56 (in Chinese with English abstract)
- Liu SG, Li ZW, Liu S, Luo YH, Xu GQ, Dai GH, Jong CM and Yong ZQ. 2006. *Formation and Evolution of Dabashan Foreland Basin and Fold-and-Thrust Belt, Sichuan, China*. Beijing: Geological Publishing House, 1–247 (in Chinese)
- Liu SG, Wang H, Sun W, Dai HS and Qing C. 2008a. Analysis on special feature of petroleum geological conditions of marine facies in Sichuan basin. *Oil & Gas Geology*, 29(6): 781–793 (in Chinese with English abstract)
- Liu SG, Sun W, Li ZW, Deng B and Liu S. 2008b. Tectonic uplifting and gas pool formation since Late Cretaceous epoch, Sichuan basin. *Natural Gas Geoscience*, 19(3): 293–300 (in Chinese with English abstract)
- Liu SG, Li ZW, Cao JX, Liu S, Deng B, Wang GZ and Deng B. 2009. 4-D textural and structural characteristics of Longmen intracontinental composite orogenic belt, southwest China. *Chinese Journal of Geology*, 44(4): 1151–1180 (in Chinese with English abstract)
- Liu SG, Zhang ZJ, Huang WM, Wang GZ, Sun W, Xu GS, Yuan HF, Zhang CJ and Deng B. 2010. Formation (destruction) process of Upper Sinian oil-gas pools at Dingshan-Lintanchang structural belt in SE Sichuan basin, China. *Petroleum Science*, 7: 289–301
- Ma L, Chen HJ and Gan KW. 2004. *Tectonic and Marine Oil/Gas Geology in South China*. Beijing: Geological Publishing House, 1–867 (in Chinese)
- Ma YS and Cai XY. 2006. Exploration achievements and prospects of the Permian-Triassic natural gas in northeastern Sichuan basin. *Oil & Gas Geology*, 27(6): 741–751 (in Chinese with English abstract)
- Pei XZ, Li RB, Ding SP, Liu QZ, Li ZC, Feng JB, Sun Y and Zhang YF. 2009. Tectonic intersection relationship between Dabashan and Micangshan in Zhenba area, southern Shaanxi Province. *Oil & Gas Geology*, 30(5): 576–584 (in Chinese with English abstract)
- Qiu NS, Qin JZ, McInnes, B I, Wang J Teng GE and Zheng LJ. 2008. Teconothermal evolution of the northeastern Sichuan basin: Constraints from apatite and zircon (U-Th)/He ages and vitrinite reflectance data. *Geological Journal of China Universities*, 14(2): 223–230 (in Chinese with English abstract)
- Shi W, Dong SW, Hu JM, Zhang ZY and Liu G. 2007. An analysis of superposed deformation and tectonic stress fields of the western segment of Daba mountains foreland. *Acta Geologica Sinica*, 81(10): 1314–1327 (in Chinese with English abstract)
- Shen CB, Mei LF, Xu ZP and Tang JG. 2007a. Architecture and tectonic evolution of composite basin-mountain system in Sichuan basin and its adjacent areas. *Geotecnica et Metallogenia*, 31(3): 288–299 (in Chinese with English abstract)
- Shen CB, Mei LF and Guo TL. 2007b. Fission track analysis of Mesozoic-Cenozoic thermal history in northeast Sichuan basin. *Natural Gas Industry*, 27(7): 24–26 (in Chinese with English abstract)
- Sun W, Liu SG, Ma YS, Cai XY, Xu GS, Wang GZ, Yong ZQ, Yuan HF and Pan CL. 2007. Determination and quantitative simulation of gas pool formation process of Sinian cracked gas in Weiyuan-Ziyang area, Sichuan basin. *Acta Geologica Sinica*, 81(8): 1153–1159 (in Chinese with English abstract)
- Tian H, Xiao XM, Wilkins RWT and Tang YC. 2008. New insights into the volume and pressure changes during the thermal cracking of oil to gas in reservoirs: Implications for the in-situ accumulation of gas cracked from oils. *AAPG Bulletin*, 92: 181–200
- Wang EQ and Yin JY. 2009. Cenozoic multi-stage deformation occurred in southwest Sichuan: Cause for the dismemberment of the Proto-Sichuan basin. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 39(3): 359–367 (in Chinese with English abstract)
- Wang MJ. 1994. Gravity and magnetic interpretation of Heishui-Quanzhou geoscience transect. *Acta Geophysica Sinica*, 37(3): 321–329 (in Chinese with English abstract)
- Wang QC and Li Z. 2003. Basin-orogen coupling and origin of sedimentary basins. *Acta Sedimentologica Sinica*, 21(1): 24–30 (in Chinese with English abstract)
- Wang TB. 2005. Distribution of large-middle sized gas fields in China: Geological characteristics and key controlling factors. *Petroleum Exploration and Development*, 32(4): 1–8 (in Chinese with English abstract)
- Wang ZC, Zhao WZ, Xu AN, Li DH and Cui Y. 2006. Structure styles and their deformation mechanisms of Dabashan foreland thrust belt in the north of Sichuan basin. *Geoscience*, 20(3): 429–435 (in Chinese with English abstract)
- Wei XG, Du SQ, Liu YC and Wu DC. 1997. Tectonic styles and evolution of Michangshan nappe tectonics. *Journal Mineral. Petrol.*, 17(S): 114–122 (in Chinese with English abstract)
- Wu DC, Wei XG, Du SQ, Liu YC, Deng MS and He ZW. 1998. The geometrical texture and structural evolution of Michanshan superposed nappe structure. *Journal Mineral. Petrol.*, 18(S): 16–20 (in Chinese with English abstract)

- Wu GY and Ma L. 2004. Orogeny and coupled/decoupled basin development: A review. *Geotecnica et Metallogenia*, 28(1): 81 – 97 (in Chinese with English abstract)
- Wu SX, Ma YS, Jin ZJ, Tang LJ and Li RF. 2006. Tectonic evolution and oil and gas accumulation in the east Micangshan foreland basin, Sichuan. *Petroleum Exploration and Development*, 2: 14 – 17 (in Chinese with English abstract)
- Yan DP, Zhang B, Zhou MF, Wei GQ, Song HL and Liu SF. 2005. 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. *Journal of Structural Geology*, 31: 150 – 162
- Zhang GW, Zhang BE, Yuan XC and Xiao QH. 2001. Qingling Orogenic Belt and Continental Dynamics. Beijing: Sciences Press, 1 – 855 (in Chinese)
- Zhang GW, Guo AL and Yao AP. 2006. Prospecting the basic study on continental geology and tectonics in China. *Progress in Natural Science*, 16(10): 1210 – 1215 (in Chinese)
- Zhou JY, Wu CL and Han ZJ. 1997. Crustal thermal structure model and thermal evolution along the Sichuan basin segment of the Heishui-quanzhou geotraverse. *Acta Geologica Sichuan*, 17(3): 161 – 167 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 程顺有, 张国伟, 李立. 2003. 秦岭造山带岩石圈电性结构及其地球动力学意义. *地球物理学报*, 46(3): 390 – 397
- 崔作舟, 卢德源, 陈纪平, 张之英, 黄立言. 1987. 攀西地区的深部地壳结构与构造. *地球物理学报*, 30(6): 566 – 580
- 代寒松, 刘树根, 孙玮, 韩克猷, 罗志立, 谢志良, 黄耀宗. 2009. 龙门山-米仓山地区下组合地表沥青特征研究. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 36(6): 687 – 697
- 邓宾, 刘树根, 刘顺, 李智武, 赵建成. 2009a. 四川盆地地表剥蚀量恢复及其意义. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 36(6): 675 – 687
- 邓宾, 刘树根, 杨锁, 张志敬, 黄文明, 宋光永. 2009b. 林滩场构造多期节理构造特征及其意义. *矿物岩石*, 29(3): 83 – 90
- 邓康龄. 2007. 龙门山构造带印支期构造递进变形与变形时序. *石油与天然气地质*, 28(4): 485 – 490
- 董云鹏, 查显峰, 付明庆, 张茜, 杨钊, 张燕. 2008. 秦岭南缘大巴山褶皱-冲断推覆构造的特征. *地质通报*, 27(9): 1493 – 1508
- 何鲤, 刘莉萍, 罗潇, 吕志洲, 王应容. 2007. 川西龙门山推覆构造特征及有利油气勘探区块预测. *石油实验地质*, 29(3): 247 – 252
- 湖北省地质矿产局. 1987. 恩施幅 1: 20 万区域地质图. 北京: 中国地质图出版社
- 胡健民, 施炜, 渠洪杰, 陈虹, 武国利, 田蜜. 2009. 秦岭造山带大巴山弧形构造带中生代构造变形. *地质前缘*, 16(3): 49 – 68
- 金宠, 李三忠, 王岳军, 张国伟, 刘丽萍, 王建. 2009. 雪峰山陆内复合构造系统印支-燕山期构造穿时递进特征. *石油与天然气地质*, 30(5): 598 – 608
- 李德威. 1995. 关于大陆构造的思考. *地球科学*, 20(1): 1 – 18
- 李德威, 夏义平, 徐礼贵. 2009. 大陆板内盆山耦合及盆山成因——以青藏高原及周边盆地为例. *地质前缘*, 16(3): 110 – 119
- 李立. 1997. 大地电磁测深(MTS)用于研究地壳上地幔的初步成果. *物探与化探*, 21(6): 40 – 467
- 李岩峰, 曲国胜, 刘殊, 张虹. 2008. 米仓山、南大巴山前缘构造特

- 征及其形成机制. *大地构造与成矿学*, 32(3): 285 – 292
- 李智武, 刘树根, 陈洪德, 刘顺, 郭兵, 田小彬. 2008. 龙门山冲断带分段-分带性构造格局及其差异变形特征. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 35(4): 440 – 454
- 林茂炳, 吴山. 1991. 龙门山推覆构造变形特征. *成都地质学院学报*, 18(1): 46 – 55
- 林茂炳, 苟宗海, 王国芝, 邓江红, 李勇, 马永旺, 王道永, 石绍清, 石和, 李永昭, 胡新伟. 1996. 龙门山中段地质. 成都: 成都科技大学出版社
- 刘和甫, 梁慧社, 蔡立国, 沈飞. 1994. 川西龙门山冲断系统构造样式与前陆盆地演化. *地质学报*, 68(2): 101 – 118
- 刘少锋, 张国伟. 2005. 盆山关系研究的基本思路、内容和方法. *地质前缘*, 12(3): 101 – 111
- 刘树根. 1993. 龙门山冲断带与川西前陆盆地的形成演化. 成都: 成都科技大学出版社
- 刘树根, 罗志立, 赵锡奎, 徐国盛, 王国芝, 张成江. 2003a. 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. *地质学报*, 77(2): 177 – 186
- 刘树根, 罗志立, 赵锡奎, 乐光禹, 刘顺, 李天斌, 宋鸿彪. 2003b. 龙门山造山带-川西前陆盆地系统形成的动力学模式及模拟研究. *石油实验地质*, 25(5): 432 – 438
- 刘树根, 徐国盛, 李巨初, 李国蓉, 罗志立, 赵锡奎. 2003c. 龙门山造山带-川西前陆盆地系统的成山成盆成藏动力学. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 20(6): 559 – 566
- 刘树根, 罗志立, 赵锡奎, 徐国强, 刘顺, 王国芝, 徐国盛, 雍自权, 李智武, 孙玮. 2005. 试论中国西部陆内俯冲型前陆盆地的基本特征. *石油与天然气地质*, 26(1): 37 – 56
- 刘树根, 李智武, 刘顺, 罗玉宏, 徐国强, 戴国汗, 龚昌明, 雍自权. 2006. 大巴山前陆盆地-冲断带的形成演化. 北京: 地质出版社, 1 – 247
- 刘树根, 汪华, 孙玮, 代寒松, 秦川. 2008a. 四川盆地海相领域油气地质条件专属性问题分析. *石油与天然气地质*, 29(6): 781 – 793
- 刘树根, 孙玮, 李智武, 邓宾, 刘顺. 2008b. 四川盆地晚白垩世以来的构造隆升作用与天然气成藏. *天然气地球科学*, 19(3): 293 – 300
- 刘树根, 李智武, 曹俊兴, 刘顺, 邓宾, 王国芝, 邓斌. 2009. 龙门山陆内复合造山带的四维结构构造特征. *地质科学*, 44(4): 1151 – 1180
- 马力, 陈焕疆, 甘克文. 2004. 中国南方大地构造和海相油气地质. 北京: 地质出版社, 1 – 867
- 马永生, 蔡勋育. 2006. 四川盆地川东北二叠系-三叠系天然气勘探成果与前景展望. *石油与天然气地质*, 27(6): 741 – 751
- 裴先治, 李瑞保, 丁仁平, 刘战庆, 李佐臣, 冯建赞, 孙雨, 张亚峰. 2009. 陕南镇巴地区大巴山与米仓山构造交接关系. *石油与天然气地质*, 30(5): 576 – 584
- 邱楠生, 秦建中, McInnes BI, 王杰, 腾格尔, 郑伦举. 2008. 川东北地区构造-热演化探讨——来自(U-Th)/He 年龄和 R_0 的约束. *高校地质学报*, 14(2): 223 – 230
- 施炜, 董树文, 胡健民, 张忠义, 刘刚. 2007. 大巴山前陆西段叠加构造变形分析及其构造应力场特征. *地质学报*, 81(10): 1314

-1327

沈传波, 梅廉夫, 徐振平, 汤济广. 2007a. 四川盆地复合盆山体系的结构构造和演化. 大地构造与成矿学, 31(3): 288-299

沈传波, 梅廉夫, 郭彤楼. 2007b. 川东北地区中、新生代热历史的裂变径迹分析. 天然气工业, 27(7): 24-26

四川省地质矿产局. 1991. 四川省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1-690

孙玮, 刘树根, 马永生, 蔡勋育, 徐国盛, 王国芝, 雍自权, 袁海锋, 盘昌林. 2007. 四川盆地威远-资阳地区震旦系油裂解气判定及成藏过程定量模拟. 地质学报, 81(8): 1153-1159

汪泽成, 赵文智, 徐安娜, 李登华, 崔瑛. 2006. 四川盆地北部大巴山山前带构造样式与变形机制. 现代地质, 20(3): 429-435

王二七, 尹纪云. 2009. 川西南新生代构造作用以及四川原型盆地的破坏. 西北大学学报(自然科学版), 39(3): 359-367

王懋基. 1994. 黑水-泉州地学断面的重磁解释. 地球物理学报, 37(3): 321-329

王清晨, 李忠. 2003. 盆地耦合与沉积盆地成因. 沉积学报, 21(1): 24-30

王庭斌. 2005. 中国大中型气田分布的地质特征及主控因素. 石油勘探与开发, 32(4): 1-8

魏显贵, 杜思清, 刘援朝, 吴德超. 1997. 米仓山推覆构造的结构样式及演化特征. 矿物岩石, 17(S): 114-122

吴德超, 魏显贵, 杜思清, 刘援朝, 邓明森, 何政伟. 1998. 米仓山叠加型推覆构造几何结构及演化. 矿物岩石, 18(S): 16-20

吴根耀, 马力. 2004. “盆”“山”耦合和脱耦: 进展, 现状和努力方向. 大地构造与成矿学, 28(1): 81-97

吴世祥, 马永生, 金之钧, 汤良杰, 李儒峰. 2006. 米仓山前陆盆地东段构造演化模式与油气聚集. 石油勘探与开发, 33(1): 14-17

张国伟, 张本仁, 袁学诚, 肖庆辉. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学. 北京: 科学出版社, 1-855

张国伟, 郭安林, 姚安平. 2006. 关于中国大陆地质与大陆构造基础研究的思考. 自然科学进展, 16(10): 1210-1215

周江羽, 吴冲龙, 韩志军. 1997. 黑水-泉州地学断面四川盆地区段的地壳热结构模型及热演化史. 四川地质学报, 17(3): 161-167