

川渝地区构造动力学演化与盆岭-盆山耦合构造分析^{*}

李忠权^{1,2} 麻成斗¹ 应丹琳³ 李洪奎^{1,2} 李应^{4,5} 万双双^{1,2} 席云飞^{1,2}

LI ZhongQuan^{1,2}, MA ChengDou¹, YING DanLin³, LI HongKui^{1,2}, LI Ying^{4,5}, WAN ShuangShuang^{1,2} and XI YunFei^{1,2}

1. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室 成都理工大学, 成都 610059

2. 国土资源部构造成矿成藏重点实验室 成都理工大学, 成都 610059

3. 中石油西南油气田分公司, 成都 610051

4. 中国地质大学能源学院, 北京 100083

5. 密苏里科技大学, 密苏里州 615401

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

2. Key Laboratory of Tectonic Controls on Mineralization and Hydrocarbon Accumulation, Ministry of Land and Resources, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

3. Southwest Oil and Gas Field Company of Petrochina, Chengdu 610051, China

4. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

5. Missouri University of Science and Technology, Missouri 615401, USA

2013-07-07 收稿, 2013-12-26 改回.

LI ZQ, Ma CD, Ying DL, Li HK, Li Y, Wan SS and Xi YF. 2014. Tectonic dynamic evolution and analysis of basin-range coupling and basin-mountain coupling in Sichuan-Chongqing region, China. *Acta Petrologica Sinica*, 30(3):631–640

Abstract From the dialectical perspective of extension and compression, this paper proposes that the Sichuan-Chongqing region has experienced a geodynamic evolution. The dynamic evolution of the main line began with compression, then regional extension, followed by uplift and stretching of the land, and finally by another stage of compression. The Sichuan-Chongqing region has experienced a geodynamic tectonic background of basin-range coupling between the Late Triassic to Middle Jurassic. During that period, sliding nappes of Indosinian and Yanshanian tectonic plates were found in the foreslope, an area roughly equivalent to the Dujiangyan-Lixian area serving as the transition zone between the range and the basin. The sliding of the Indosinian and Yanshanian results in the formation of imbricate thrusting faults, tight folds, and even the emergence of overturned and recumbent folds. Since the Late Jurassic, the shifting geodynamic tectonic background has resulted in the formation of many of the present day geologic landmarks in the Sichuan-Chongqing region after the Late Jurassic compression events gave way to the formation of the thick-skinned and basement-involved structure. After the basement structure formed after the Late Jurassic, many present day formations such as the Longmen Mountain rapidly rose, the Sichuan basin formed, and the basin-mountain coupling structure pattern consisting of the Songpan-Ganzi plateau-Longmen Mountain-Sichuan basin formed.

Key words Songpan-Ganzi plateau; Longmen Mountain; Sichuan basin; Basin-range coupling; Basin-mountain coupling; Southwest basin

摘要 以构造动力学演化为主线,从拉张与挤压的辩证关系出发,提出了川渝地区构造动力学演化经历了挤压-区域拉张-陆隆伸展-再挤压的构造动力学演化过程;川渝地区在 T_3 - J_2 期间为盆岭耦合构造格局,在当时山岭与盆地之间过渡的斜坡带前缘(大致相当于理县至都江堰地域),出现印支-燕山期滑覆构造,表现为山岭斜坡前缘逆冲叠瓦状断层与紧闭甚至倒转、平卧褶皱的出现; J_3 以来,构造动力学背景由伸展转变为挤压,形成基底卷入的厚皮构造,龙门山迅速崛起,四川盆地最终定型,形成现今见到的松潘甘孜高原-龙门山-四川盆地构成的盆山耦合构造格局。

* 本文受国家自然科学基金重点项目(41030426)、国家自然科学基金主任基金(41340004)、国家重大专项(2011ZX05004-005-01)和四川省省属高校科研创新团队(13TD0007)联合资助。

第一作者简介:李忠权,男,1965年生,博士,教授,主要从事构造地质、石油地质研究,E-mail: lizq@cdut.edu.cn

关键词 松潘高原; 龙门山; 四川盆地; 盆岭耦合; 盆山耦合; 西南盆地

中图法分类号 P542

1 引言

“川渝地区”主要指四川省及重庆直辖市地域范围,位于中国西南部。在这一地域内分布有复杂的地质-地貌构造单元(李忠权等,2011),地貌反差强烈,从盆地、山脉、高原都有发育。区内由东向西主要分布有四川盆地、龙门山造山带及松潘甘孜高原(图1),是研究盆岭耦合、盆山耦合及大陆构造动力学的天然实验场地。本文主要探讨四川盆地西边界构造动力学演化及盆地-山脉-高原的构造耦合过程。

早在20世纪30年代,赵亚曾、黄汲清、李春昱、朱森、叶连俊、潘钟祥等老一辈地质学家就对四川盆地周边的龙门山、大巴山及前山带煤矿资源的开发和地层划分进行了开创性的研究工作,并首先在彭灌地区发现了众多的飞来峰构造,初次揭示阿尔卑斯型造山带可能在这一地区存在,其后又经一些地质学家的进一步调查,龙门山遂以中国逆冲推覆构造发育的典型地带而驰名中外(刘和甫等,1999,2000),近年来又有地质学家提出走滑模式(王二七和孟庆任,2008)。汶川地震后,不同专业领域的学者对龙门山及其周缘从地壳结构、流变学、热史、现今地应力场、盆山结构、前陆盆地与油气等方面做了大量研究(张培震,2008; Robert *et al.*, 2010; Zheng *et al.*, 2010; 曹俊兴等,2011; 李勇等,2011; 刘树根等,2011; Zhao *et al.*, 2012),但始终没有从开合构造理论和拉张与挤压的辩证关系述及四川盆地西边界构造动力学演化,更没有述及盆岭构造及其耦合关系,只是简单认为松潘甘孜高原、龙门山造山带、四川盆地之间的耦合关系为盆山耦合。

龙门山造山带东、西两侧地貌景观和地质构造迥然不同,东面是四川盆地,西面是松潘甘孜高原,属青藏高原的东北部分(李忠权等,2011)。因此,对盆地-山脉-高原的结构、构造动力学及构造耦合关系研究一直是中外地质学家及油气勘探学家关注的热点。随着油气勘探从盆地向造山带及高原的逐步深入,迫切需要对四川盆地、龙门山造山带及松潘甘孜高原的构造耦合过程、形成机制、构造动力学演化及油气富集规律等这些基本科学问题从新的视角、观点进行重新审视、探究。这不仅丰富了高原、造山带与盆地构造耦合理论,而且对四川盆地及周边构造带下一步油气勘探战略有很大的指导意义。

2 川渝地区构造动力学演化

从全球构造及其动力学演化的观点分析,挤压作用与拉张作用是构造作用在时间和空间上紧密相关的两个方面,如果把地球作为一个统一的大系统进行观察,对某一个地史阶

表1 川渝地区构造动力学演化

Table 1 Tectonic evolution of the Sichuan-Chongqing area

时期	构造动力学背景	运动结果	构造特征	备注
J ₃ -现在	挤压	形成现今盆地的构造格局	挤压构造	由于伸展与挤压构造的交替,应特别注意反转构造研究
T ₃ -J ₂	陆隆伸展	实现由海相向陆相的转变	滑覆构造	
Z-T ₂	区域拉张	形成巨厚的海相克拉通盆地沉积	伸展构造	
前震旦纪	挤压	形成褶皱基底古陆核	挤压构造	

段而言(时间一定),某一地区处于挤压,那么在毗邻的另一地区一定存在拉张,拉张与挤压是并存的(李忠权等,2001)。反之,对某一特定地区而言,在某一时期处于拉张,另一时期则可能转换成挤压,随着时间的推移在四维尺度上拉张与挤压是交替进行的。按照此观点,对川渝地区构造动力学演化进行研究(表1),可以发现,川渝地区这一有机联系的时空地质演化统一系统(包括四川盆地、龙门山、松潘甘孜高原)构造动力学演化经历了前震旦纪挤压,Z-T₂区域拉张,T₃-J₂陆隆伸展,J₃-现今挤压的过程(表1)。

(1)前震旦纪:此期总体表现为挤压构造动力学背景,川渝地区所在的上扬子地块在经历吕梁运动与晋宁造山运动之后,形成前寒武古陆,在此基础上,剥蚀夷平,形成基底古陆核。

(2)Z-T₂:此期总体表现为区域拉张构造动力学背景,形成川渝地区巨厚的海相克拉通盆地沉积。根据震旦系-中三叠世各时期地层展布特征与地层沉积的岩性岩相特征,这一时期又可分为两个阶段:震旦纪-志留纪海盆形成扩张阶段,泥盆纪-中三叠世海盆震荡升降造陆阶段。

①震旦纪-志留纪海盆形成扩张阶段:前震旦纪形成的古陆核在这一阶段开始裂解拉张成洋,表现为由陆变海、变洋,且海盆逐渐扩大变深的过程;早古生代拉张成洋这一过程可从盆地钻井资料及龙门山周边早古生代地层沉积记录中得到反映:

(a)震旦系下统(苏雄组、开建桥组):为一套陆相安山岩、安山斑岩,流纹岩、流纹质凝灰岩。反映这一时期,地壳进入强烈拉张期,火山活动强烈。

(b)震旦系上统(南沱组、陡山沱组、灯影组):陆相灰绿色冰渍层及紫红色砂泥岩,黑色炭质页岩与白云岩,葡萄状白云岩。反映这一时期,地壳拉张下沉,由陆逐渐变海,沉积物也由陆相变为海相。

(c)寒武系:黑色页岩、泥岩、白云岩、局部含砂质及燧石。

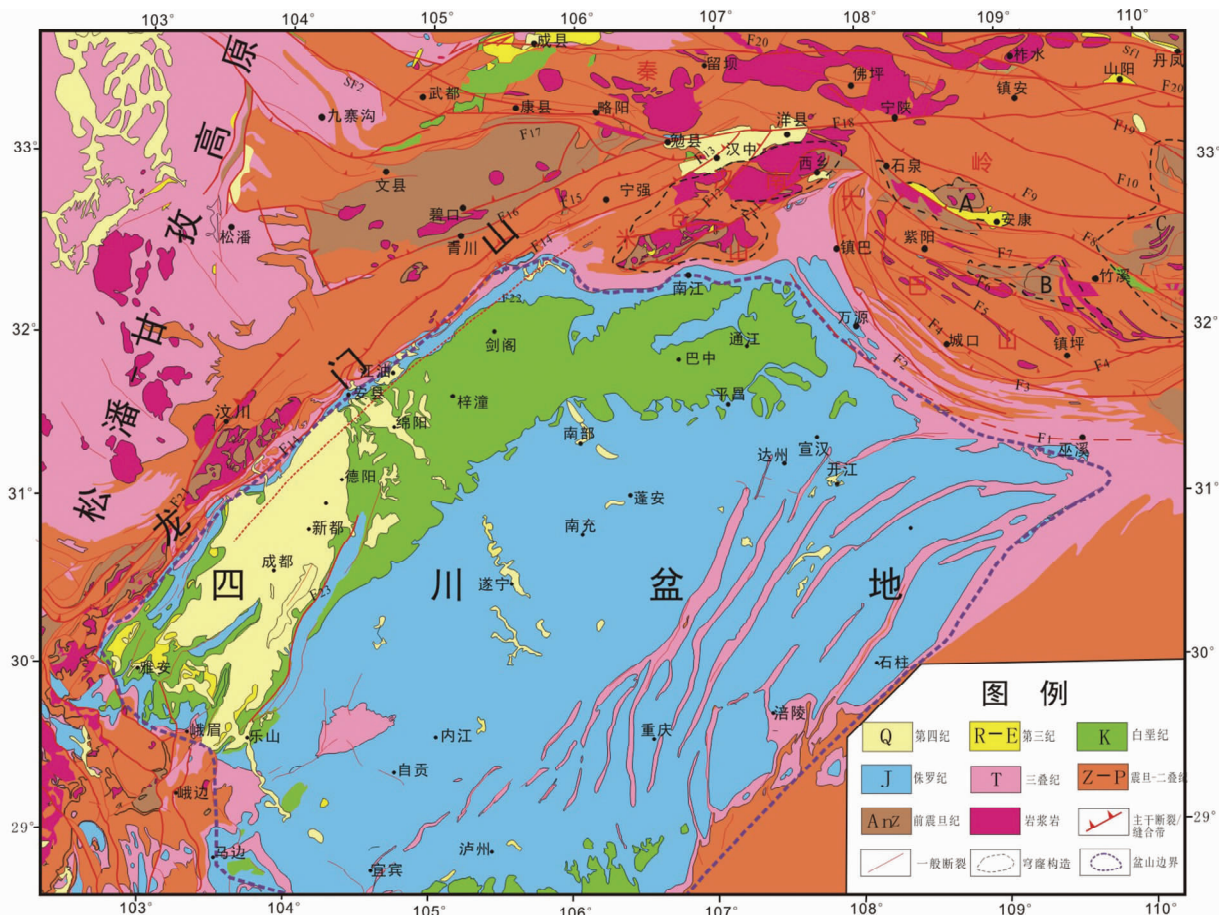


图1 川渝地区盆地-山脉-高原地质略图(据四川省地质矿产局,1991^①;马丽芳等,2002^②修改)

穹窿构造:A-凤凰山-慢坡岭穹隆,B-平利穹隆,C-武当穹隆;缝合带:SF1-商丹缝合带,SF2-勉略缝合带.断裂带:F1-铁溪-巫溪隐伏断裂,F2-镇巴断裂,F3-兴隆场断裂,F4-城口断裂,F5-鲁家坪断裂,F6-高桥断裂,F7-红椿坝断裂,F8-安康-青峰断裂,F9-银杏-阎河-峡岭断裂,F10-十堰断裂,F11-水磨-大巴-西乡断裂,F12-年家坝-槐树-国华断裂,F13-朝天-新集断裂,F14-灌县-安县断裂,F15-映秀-北川-关庄大断裂带,F16-青川大断裂带,F17-勉略断裂,F18-平阳关-宁陕断裂,F19-两郧断裂,F20-山阳-凤镇断裂,F21-茂县-汶川断裂,F22-广元-大邑隐伏断裂带,F23-龙泉断裂

Fig. 1 Geological sketch map of basin-mountain-plateau in the Sichuan-Chongqing area

反映海水逐渐加深,由海变洋的过程。

(d)奥陶系:页岩夹灰岩、细砂岩、粉砂岩页岩互层,有时夹灰岩。

(e)志留系:灰绿色页岩、粉砂质页岩,富含笔石。

以上这套震旦-早古生代沉积演化序列很好地记录了由陆变海,且海盆不断加深的演变过程。在震旦纪这2.8亿年期间(8.5~5.7亿年),地壳就完成了由陆到海的转变,此后的寒武-奥陶-志留纪总体表现为一个海盆逐渐扩大变深的过程。

②泥盆纪-中三叠世海盆震荡隆升造陆阶段:从动力学角度分析,晚古生代-中三叠世这一时期主要表现为陆隆伸展背景下的差异隆升运动,因此,是一个海盆逐渐缩小,陆地

逐渐扩大的过程。从志留纪末期的加里东运动开始,一直到晚古生代泥盆-石炭-二叠纪及中生代早、中三叠世,整个川渝海相克拉通盆地内部没有见到明显的角度不整合(没有发生褶皱造山),但大型的隆起和坳陷及断块的差异升降活动特别突出(拉张伸展坳陷构造),如泥盆、石炭纪以四川、黔北为主体的上扬子古陆,始终保持着上升状态,导致古陆面积逐渐扩大,海盆面积逐渐缩小,结果造成泥盆、石炭系在地台内部大面积缺失,出现大面积平行不整合(造陆运动结果);印支期泸州-开江古隆起的出现也是陆隆伸展的结果。但在古陆边缘受断裂控制的沉降带(大型地堑带),却有巨厚的泥盆、石炭系沉积,最明显的一个沉降带是位于上扬子古陆西缘的龙门山,在泥盆、石炭纪沉积时为一北东向裂陷槽,沉积

① 四川省地质矿产局. 1991. 1:100万四川省地质图

② 马丽芳等. 2002. 1:200万秦岭-大巴山地区地质图

了一套厚约 5000 余米的灰岩夹砂页岩地层。

几经海进、海退,中三叠世末,包括川渝地区在内的上扬子海盆完全隆升成陆,结束了海相克拉通盆地沉积历史,进入了以内陆湖盆、河流相沉积为主的发展时期。中三叠世末的早印支运动是川渝地区地质发展史上具有重大转折的一次构造运动,它表现为大面积区域面状差异隆升,形成大型陆隆伸展坳陷构造样式。从此进入大陆演化阶段的板内拉张成盆(湖)、成岭;挤压造山、造盆的大陆动力学演化过程。

(3) T_3-J_2 : 此期总体表现为大陆体制下的陆隆伸展,形成大陆体制下的盆岭构造耦合。这一时期的印支-燕山运动主要表现为大面积的造陆差异隆升,形成陆相盆地及其周缘山岭、陆地。川渝地区及云南、贵州一带在中三叠海相雷口坡组地层沉积后,大面积隆升造陆,全面由海变陆。由于地块间隆升速率的差异,西部松潘甘孜至云南丽江、大理、景谷一带隆升快,四川盆地至贵阳、昆明、过旧一代隆升相对较慢,逐渐形成西高(山岭)东低(盆地)的印支期盆岭构造耦合系统(图2)。从图2可以看出,印支期时,整个川渝地区和滇、黔地区都大面积由海变陆,大致以现今龙门山断裂、金河-箐河断裂为界,西面松潘、甘孜、丽江、大理、景谷一带大面积隆升成为山岭,而成都、重庆、贵阳、昆明、过旧广大地区则相对沉降形成印支期西南盆地。印支期西南盆地(约 $45 \times 10^4 \text{ km}^2$) 沉积范围包括现今四川盆地、西昌盆地、滇中、滇西、黔东北、黔北及贵阳地区,是现今四川盆地(约 $18 \times 10^4 \text{ km}^2$) 的 2.5 倍,当时沉降中心位于四川盆地川西地区(沉积厚度大于 4000m)和永胜(云南)-盐源(四川)地区(沉积厚度大于 2000m),盆地沉积中心位于西昌-峨边-宜宾-贵州威信-云南昭通地区,为浅湖相区。

根据林茂炳(1996)的研究认为:晚三叠世之后发生的燕山运动对龙门山及其邻近的川西高原来讲是一次大面积的区域隆升,涉及范围可达 $22 \times 10^4 \text{ km}^2$;而四川盆地则表现为大面积沉降,接受以侏罗系为主的拗陷期沉积。这一时期松潘甘孜高原作为一个块体抬升,绝非几次推覆作用所能奏效的,它反映了一个地块沿着根基的块状隆升。它至少已涉及到了表层特提斯域的东部地层、下部泛扬子地台沉积盖层、甚至影响到了更深的基底岩石。这说明松潘甘孜高原及四川盆地侏罗纪时期发生的燕山运动也不是造山运动,而是一次形成大型盆岭构造的造陆运动。

(4) J_3 -现在: 此期总体表现为挤压构造动力学背景,逐渐形成现今盆岭耦合构造格局。进入晚侏罗世遂宁组、蓬莱镇组沉积时,由于拉萨地体的拼贴挤压,西南盆地沉积范围开始逐渐缩小,整个包括川渝地区在内的西南地区构造动力学环境开始由拉张转化为挤压,构造耦合也由盆岭耦合转化为盆山耦合。到白垩纪晚期,印度板块开始与欧亚大陆碰撞,挤压作用逐渐强烈,龙门山完全崛起。盆地演化则由 T_3-J_2 的断陷、拗陷盆地逐渐反转演化为 J_3 以来的前陆盆地,盆内发育了一系列逆断层(Bergen and Shaw, 2010)。盆地范围逐渐缩小,最终形成现今四川盆地与龙门山-松潘甘孜高原



图2 印支期西南盆地与其周边山岭、陆地展布图(据李国辉等,2012 修改)

Fig. 2 Distribution map of the southwest basin, ranges, and lands in the Indosinian (revised after Li *et al.*, 2012)

的盆山耦合构造格局。

纵观中三叠世海相雷口坡组沉积以来,包括川渝地区在内的广大西南地区由海盆隆升成陆,形成大陆体制下的构造格局。其构造耦合经历了盆岭耦合与盆山耦合两个时期:①晚三叠世-中侏罗世,是包括川渝地区在内的广大西南地区差异隆升造陆过程,由于隆升速率的差异,形成盆岭耦合系统,出现断陷-拗陷盆地,中侏罗世沙溪庙组沉积时,西南盆地沉积范围、沉积厚度达到其顶峰时期。②上侏罗统-现在,构造动力学发生反转,早期拉张动力转化为挤压动力,且挤压动力逐渐加强,龙门山造山带逐渐定型,构造系统由先期的盆岭构造转为此期的盆山构造,西南盆地逐渐分化、缩小形成现今四川盆地。到白垩纪,盆地已成带状局限于龙门山山前,至古近纪、新近纪、第四纪盆地趋于消失,成为如今看到的状况。

总之,通过以上分析可以发现,松潘-甘孜、龙门山及四川盆地的形成不是由某一期动力过程一次完成的,也不能用一个简单的推覆构造模式解释龙门山及其邻区所有地质和地球物理现象,龙门山地域现今构造面貌应该是在基底形成之后,经过松潘-甘孜海开合演化、松潘-甘孜地域、四川盆地地域差异造陆隆升(四川盆地相对沉降)和晚侏罗世以来的龙门山逆冲推覆这三个不同性质、不同尺度的构造过程叠加

而成的,前两者是板块体制下发生的由地幔软流圈驱动的岩石圈动力学过程,导致海陆变迁和大陆造陆增生(造陆运动),后者是板内体制下由地壳软流层(下地壳)驱动的以盆山耦合、圈层作用为核心的大陆动力学过程(板内造山造盆)。

3 盆岭耦合、盆山耦合异同点分析

盆岭耦合与盆山耦合很多时候都将它们没加区别,认为是基本等同的概念。隆升成山,下降成盆,将山岭和山脉没有从构造动力学的角度加以区分。

实际上,挤压和拉张都可形成盆地和山脉,但在构造地质学上,其动力学性质是不同的,确切说,挤压作用形成盆山构造,对应盆山耦合;拉张作用形成盆岭构造,对应盆岭耦合。

盆岭构造(basin and range tectonics)是地壳大规模伸展活动的一种表现,是指在拉张伸展构造动力学环境下(如热隆伸展,陆隆伸展),在地壳伸展区,因地壳差异升降形成由山岭、高原与宽广盆地组合而成的构造-地貌单元。其构造样式主要表现为:掀斜构造、阶梯状断层、坳垒构造等。美国西部科迪勒拉山系的盆岭区是建立盆岭构造的经典地区(Velasco *et al.*, 2010; Bashir *et al.*, 2011; Egger and Miller, 2011),我国东部地区晚侏罗世以来主要发育的也是盆岭构造,如晋北张性区盆岭构造(徐锡伟和邓起东,1988)。盆岭构造与板块俯冲、热隆、地幔柱隆升的山岭、高原密切相关,往往是造陆运动的结果。

盆山构造(basin and mountain tectonics)是地壳大规模挤压活动的一种表现,是指在挤压缩短构造动力学环境下,在地壳收缩区,因地壳褶皱、逆冲形成的狭长造山带及与其基本平行的线状盆地组合而成的构造-地貌单元。其构造样式主要表现为:紧闭褶皱、逆冲断层、叠瓦构造等。欧洲阿尔卑斯山及其山前带是盆山构造研究的经典地区,我国西部地区晚侏罗世以来主要发育的也是盆山构造。盆山构造与板块碰撞、地壳收缩、冷地幔柱下沉形成的线性山脉、高山密切相关,往往是造山运动的结果。国内学者在盆山构造研究方面取得了突出进展(张进等,2004;王二七和孟庆任,2008;郑荣才等,2008,2012)。

盆岭构造与盆山构造主要差异是形成时的构造动力学环境不同。盆岭构造主要受拉张伸展构造动力学环境控制, σ_1 在垂直方向, σ_3 在水平方向(图3),盆山构造主要受挤压缩短构造动力学环境控制, σ_1 在水平方向, σ_3 在垂直方向(图4)。由于构造研究源于造山带,造山带又以挤压变形为特色,以致曾长期忽视拉张伸展作用及其形成的伸展构造。关于伸展构造的重要性,马杏垣教授曾精辟地指出:“其实,引张作用也造就了全球范围的构造现象,其规模甚至比挤压变动还更大”。

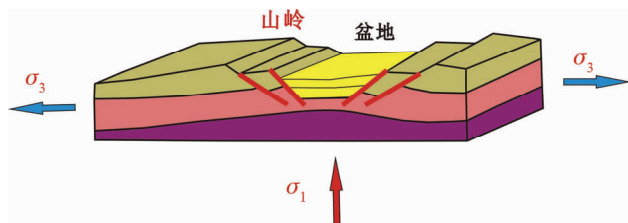


图3 拉张环境下盆岭构造模式图

Fig. 3 Basin-range structural model in extensional geodynamic environment

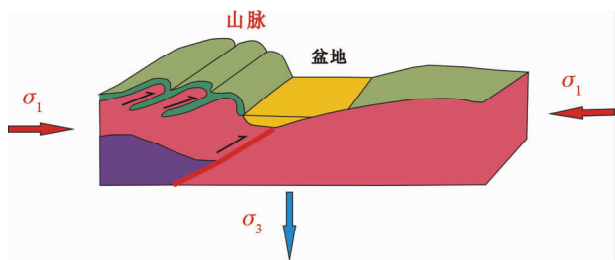


图4 挤压环境下盆山构造模式图

Fig. 4 Basin-mountain structural model in compressional geodynamic environment

4 川渝地区盆岭耦合-盆山耦合构造分析

川渝地区经历了海相盆地-海陆交换相盆地-陆相湖盆、山岭-陆相高原、山脉-盆地演化过程,其动力学演化经历了由拉张到挤压的转变,相应形成了伸展构造、挤压构造及反转构造的有机组合与相互叠加。松潘甘孜地域的隆升、龙门山的崛起都导致了四川盆地构造动力学体制的改变,使得四川盆地与周边高原与山脉之间在不同地质历史时期经历了不同的构造耦合历程,形成了由盆岭耦合向盆山耦合的构造体制的转变。本文所说的构造耦合主要包括盆岭耦合与盆山耦合这两个动力学性质截然不同的地质耦合过程。

过去在中国西部对松潘甘孜高原-龙门山-四川盆地这个有机联系的时空演化统一系统主要开展的是盆山耦合研究,还没有发现从盆岭-盆山叠加耦合这个角度开展的研究。盆岭耦合与盆山耦合是地球构造变动的两个方面,其最主要的构造表现形式就是大型盆岭构造与盆山构造。它们是矛盾对立统一两个方面,永远处于动态平衡与相互转化过程中,形成复杂的构造叠加与构造反转格局。

在中国,现今的构造研究现状是:西部主要开展的是挤压构造-盆山构造研究,东部主要开展的是伸展构造-盆岭构造研究。这与晚侏罗纪以来,我国构造体制由古亚洲构造域转为特提斯构造域与滨太平洋构造域之后,形成西部挤压、东部拉张的构造大格局有关。晚侏罗纪以来,中国西部处于挤压构造动力学环境,东部处于拉张构造动力学环境,因此,西部是典型挤压构造与盆山耦合研究区,东部则是典型的伸

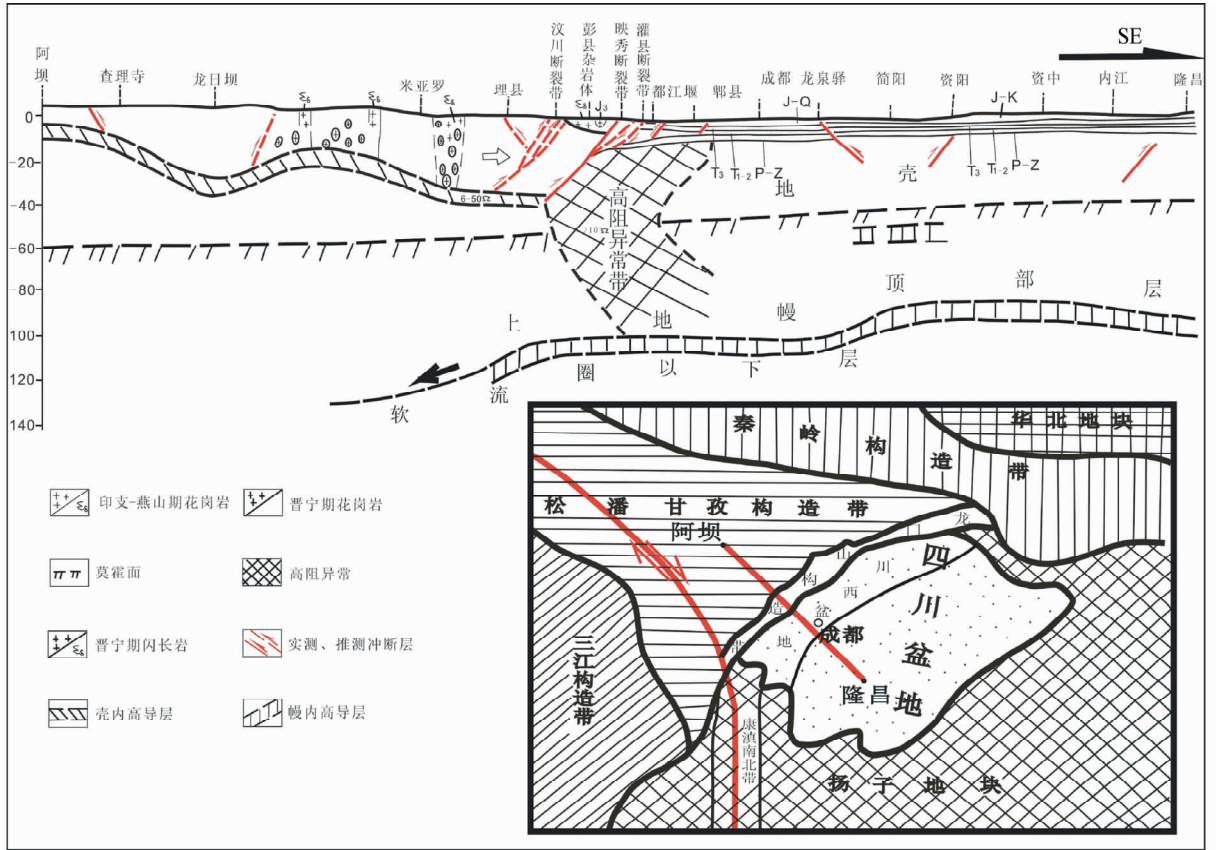


图5 阿坝-隆昌地球物理地质解释剖面图(据李立和金国元,1987;刘树根等,1991;宋鸿彪,1994 修改)

Fig. 5 Geological interpretation of the magnetotelluric sounding profile of the Aba-Longchang (revised after Li and Jin, 1987; Liu *et al.*, 1991; Song, 1994)

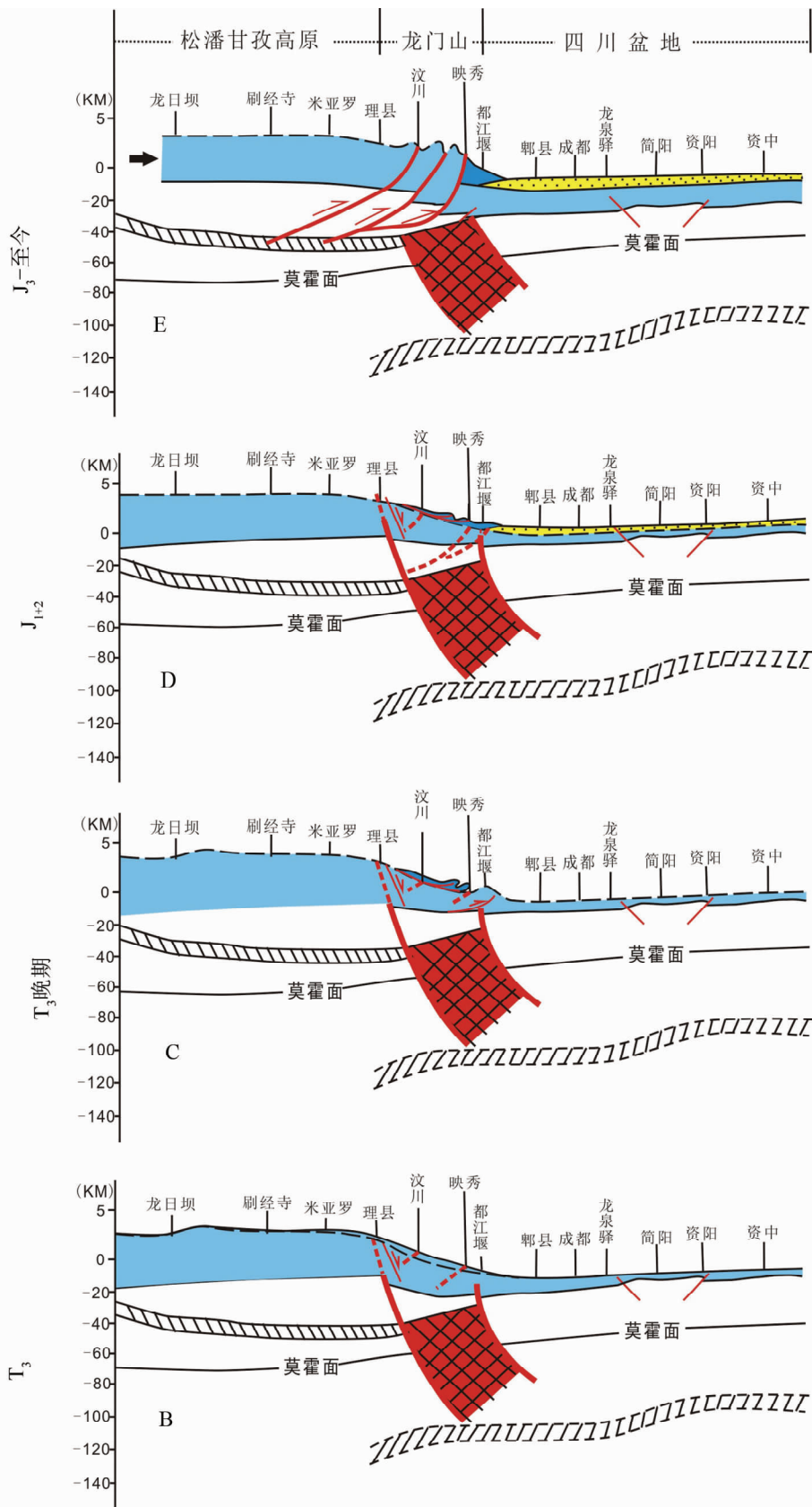
展构造及盆岭耦合研究区。但现在有越来越多的资料表明,在中晚三叠到中侏罗世这个时期,中国区域构造动力学背景正好与现在相反,西部处于拉张,东部处于挤压。因此,自中晚三叠纪中国由海变陆进入大陆构造动力学体制演化以来,中国西部构造动力学环境存在由拉张到挤压的正反转,东部构造动力学环境则存在由挤压到拉张的负反转。基于这一认识,我们重新审视松潘甘孜高原-龙门山-四川盆地作为一个有机统一体在不同地质时期的构造耦合关系。

针对四川盆地的研究已经很多,以往主要是从单一挤压构造动力学的角度研究晚三叠世以来的构造、沉积与油气成藏。将晚三叠世由海盆变为陆盆以来的构造演化、沉积建造都与挤压构造动力学环境相联系,将造陆隆升的山岭、高原构造动力学环境与褶皱造山带构造动力学环境没加区别,因此过去四川盆地与周边山体之间主要探讨的是挤压动力学环境下的盆岭耦合关系,没有注意到曾经在 T_3 到 J_2 这个时期,龙门山主体还没有形成(只在北段由于勉略洋的关闭,摩天岭构造的出现形成一些隆升-前缘滑覆挤压构造系统的雏形),但松潘甘孜高原-四川盆地由于大规模造陆运动,已经由海面之下“差异造陆隆升”逐渐高出海面,形成盆岭构造。因此,四川盆地(属西南盆地的一部份)在当时主要是与松潘

甘孜山岭之间形成的山岭与盆地之间的构造耦合关系,这种关系应理解为由海变陆过程中,由于地壳的均衡调整,发生大范围“差异造陆隆升”(这种隆升最大主应力轴 σ_1 在垂直方向,最小主应力轴 σ_3 在水平方向,因此造陆隆升应属伸展构造动力学环境,即“陆隆伸展”),四川盆地与松潘甘孜地域都由海平面以下垂直升高出海面进入大陆构造演化体制,但由于两者之间隆升速率的差异,松潘甘孜地域隆升较快形成山岭,四川盆地隆升较慢形成盆地,两者之间则形成由山岭向盆地过度的大型斜坡带(宽约 30~60km),此斜坡带深部由一大型正断层控制。这一大型正断层在阿坝-隆昌地球物理地质大剖面中有明显异常显示(图5),图5中深埋地腹的位于映秀逆冲断裂带之下的大型南东倾向高阻异常带就是印支期控制地表斜坡带的深部正断层带的反映,此带宽度与现今龙门山造山带宽度大致相当。印支期山岭、斜坡和盆地共同构成了当时的盆岭构造格局。

基于以上认识,我们认为晚三叠世至早中侏罗世,松潘甘孜-龙门山-川西盆地的耦合关系为盆岭耦合,晚侏罗-现今转变为盆山耦合。松潘甘孜高原-龙门山-川西盆地晚三叠世前、后的构造演化模式如图6所示(分A、B、C、D、E五个阶段)。

A、晚三叠世以前($Z-T_2$),松潘甘孜、龙门山、四川盆地地



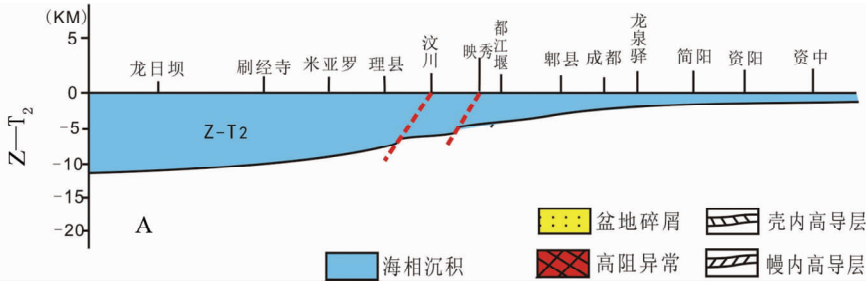


图6 松潘甘孜高原-龙门山-四川盆地晚三叠世前后构造演化模式图

Fig. 6 The tectonic evolution model of the Songpan-Ganzi plateau-Longmen Mountain-Sichuan basin before and after the Late Triassic

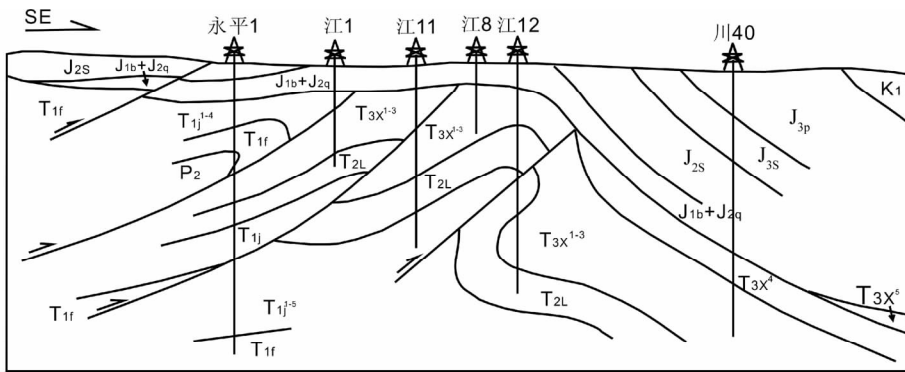


图7 龙门山前缘北段海棠铺构造剖面示意图(据王金琪,2003)

Fig. 7 Sketch map of the Haitangpu in front of the northern section of the Longmen Mountain (after Wang, 2003)

域整体处于海洋沉积背景(大致以理县、都江堰为界,理县以西为松潘甘孜高原地域,理县至都江堰为龙门山地域,都江堰以东为四川盆地地域),属倾向北西的被动陆缘环境(图6A),由南东向北西海水逐渐加深,Z-T₂沉积了一套北西厚、南东薄的以碳酸盐岩为主的海相沉积地层。当时的松潘甘孜高原、龙门山、四川盆地都不存在,表现为统一的海盆沉积背景,在映秀、汶川有可能发育两条向北西倾斜的正断层。

B、晚三叠期间(T₃):松潘-甘孜、龙门山、四川盆地地域全面造陆隆升,逐渐由海变陆,由于差异隆升,北西端隆升快,南东端隆升慢,形成北西高、南东低的盆岭构造耦合,在现今龙门山地域形成由松潘甘孜山岭向四川盆地过渡的大型斜坡带,此斜坡带深部由一向南东倾斜的大型阶梯状正断层带控制(深部出现高阻异常带),如图6B。

C、晚三叠纪晚期:在松潘甘孜山岭向四川盆地过渡的斜坡带上,由于重力滑覆作用,斜坡上的地层向南东滑覆,前缘挤压,后缘拉张,在前缘与四川盆地接触带附近形成褶皱逆冲构造带(图6C),此褶皱逆冲构造带很多表现为倒转甚至平卧褶皱,前缘靠四川盆地侧可出现地腹叠瓦或双重构造形成的地表背斜构造。从这里可以看出,龙门山在印支时期时总体表现为一大型斜坡带,深部受大型正断层带控制,地表斜坡下倾靠盆地部位出现一系列滑覆作用形成的褶皱逆冲构造带。现今的海棠铺就是这一局部挤压应力环境中的产物

(图7)。

D、早、中侏罗纪期间(J₁₊₂):松潘-甘孜和龙门山地区主要遭受剥蚀,四川盆地(属当时西南盆地的一部分)广泛接受沉积,山岭和盆地之间相对高程逐渐缩小,龙门山斜坡带还是以发育薄皮滑覆构造为主(图6D)。

E、晚侏罗纪(J₃)以来,由于拉萨地体的拼贴(晚侏罗班怒缝合带),印度板块的碰撞(晚白垩印度-雅鲁藏布缝合带),构造动力学背景由拉张逐渐转变为挤压,在大约60Ma、40Ma、25Ma、10Ma出现多次强烈挤压逆冲抬升,川渝地区发生基底卷入的变形、变位,松潘甘孜地区进一步隆升由山岭变为高原,龙门山迅速崛起,T₃-J₂时期统一的西南盆地(45 × 10⁴km²)由于构造变形、变位的影响,逐渐支离破碎,分化为多个小型残留盆地(如四川盆地,西昌盆地等),最终形成现今见到的面积为18 × 10⁴km²的四川盆地(构造盆地),形成现今见到的盆山构造耦合格局(图6E)。

5 结论

(1)基于开合构造理论及拉张与挤压的辩证关系,提出了川渝地区构造动力学演化经历了前震旦纪挤压,震旦纪-中三叠世区域拉张,晚三叠-中侏罗世陆隆伸展,晚侏罗世-现今挤压的构造动力学演化过程。川渝地区所处的构造动力

学背景主要在挤压与拉张两种状态中有序转变。

(2)川渝地区在 T_3 - J_2 期间,主要以陆隆伸展形成的盆岭构造为特色,在当时松潘甘孜山岭与四川盆地(西南盆地的一部分)之间过渡的斜坡带(大致相当于理县至都江堰地域)部位,出现印支-燕山期滑覆构造(属薄皮构造),表现为山岭斜坡前缘逆冲叠瓦状断层与紧闭褶皱、倒转褶皱和平卧褶皱的出现。

(3) J_3 以来,由于地体、板块的拼贴、碰撞,构造动力学背景转变为挤压,形成基底卷入的厚皮构造。龙门山迅速崛起, T_2 - J_3 时期统一的西南盆地由于构造变动影响,逐渐破裂分化,形成多个小型残留盆地,四川盆地最终独立分化出来,形成现今见到的松潘甘孜高原-龙门山-四川盆地构成的盆山耦合构造格局。

References

Bashir L, Gao SS, Liu KH *et al.* 2011. Crustal structure and evolution beneath the Colorado Plateau and the southern Basin and Range Province: Results from receiver function and gravity studies. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 12(6): 1525–2027

Bergen KJ and Shaw JH. 2010. Displacement profiles and displacement-length scaling relationships of thrust faults constrained by seismic-reflection data. *Geological Society of America Bulletin*, 122(7–8): 1209–1219

Cao JX, Liu SG, Tian RF *et al.* 2011. Seismic prediction of carbonate reservoirs in the deep of Longmenshan foreland basin. *Acta Petrologica Sinica*, 27(11): 2423–2434 (in Chinese with English abstract)

Egger AE and Miller EL. 2011. Evolution of the northwestern margin of the Basin and Range: The geology and extensional history of the Warner Range and environs, northeastern California. *Geosphere*, 7(3): 756–773

Li GH, Li N, Xie JR *et al.* 2012. Basic features of large gas play fairways in the Upper Triassic Xujiahe Formation of the Sichuan foreland basin and evaluation of favorable exploration zones. *Natural Gas Industry*, 32(3): 15–21 (in Chinese with English abstract)

Li L and Jin GY. 1987. Telluric electromagnetic sounding study of crust and upper mantle in the Panxi Rift Zone and the Longmenshan Faulted Zone. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 11(3): 161–169 (in Chinese with English abstract)

Li Y, Su DC, Dong SL *et al.* 2011. Dynamic of drowning of the carbonate ramp and sponge build-up in the early stage (Carnian) of Longmen Shan foreland basin, Late Triassic, China. *Acta Petrologica Sinica*, 27(11): 3460–3470 (in Chinese with English abstract)

Li ZQ, Pan M, Xiao DM *et al.* 2001. Studies of extension-compression tectonic dynamic setting in Sichuan basin. *Acta Seientium Naturalium Universitatis Pekinensis*, 22(3): 30–35 (in Chinese with English abstract)

Li ZQ, Ying DL, Li HK *et al.* 2011. Western Sichuan basin evolution and characteristics of superimposed basin. *Acta Petrologica Sinica*, 27(8): 2362–2370 (in Chinese with English abstract)

Lin MB. 1996. A primary discussion on the orogenic model for inner continental orogenic belts-on the example of Longmenshan orogenic belt. *Acta Geologica Sichuan*, 16(3): 193–198 (in Chinese with English abstract)

Liu HF, Xia YP, Yin JY *et al.* 1999. Slip coupling mechanism orogenic belts and basins. *Earth Science Frontiers*, 6(3): 121–132 (in

Chinese with English abstract)

Liu HF, Wang ZC, Xiong BX *et al.* 2000. Coupling analysis of Mesozoic-Cenozoic foreland basin and mountain system in central and western China. *Earth Science Frontiers*, 7(3): 55–72 (in Chinese with English abstract)

Liu SG, Luo ZL and Cao SH. 1991. On the mechanism of a new type of intracontinental subduction: The Longmenshan subduction. *Experimental Petroleum Geology*, 13(4): 314–324 (in Chinese with English abstract)

Liu SG, Deng B, Li ZW *et al.* 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 (in Chinese with English abstract)

Robert A, Pubellier M, Sigoyer JD *et al.* 2010. Structural and thermal characters of the Longmen Shan (Sichuan, China). *Tectonophysics*, 491(1–4): 165–173

Song HB. 1994. The comprehensive interpretation of geological and geophysical data in the orogenic belt of Longmen Mountains, China. *Journal of Chengdu Institute of Technology*, 21(2): 79–88 (in Chinese with English abstract)

Velasco MS, Bennett RA, Johnson RA *et al.* 2010. Subsurface fault geometries and crustal extension in the eastern Basin and Range Province, western U. S. *Tectonophysics*, 488(1–4): 131–142

Wang EQ and Meng QR. 2008. Discussions on the tectonic evolution of the Longmen Shan from Mesozoic to Cenozoic. *Science in China (Series D)*, 38(10): 1221–1233 (in Chinese)

Wang JQ. 2003. Recognition on main episode of Indo-China Movement in the Longmen mountains: A re-review on the Anxian Tectonic Movement. *Geologica Sichuan*, 23(2): 65–69 (in Chinese with English abstract)

Xu XW and Deng QD. 1988. The basin-range structure in the tensile area at the northern part of Shanxi Province and its mechanism of formation. *Earthquake Research in China*, 4(2): 19–27 (in Chinese with English abstract)

Zhang J, Ma ZJ and Ren WJ. 2004. Thinking on the present research of basin-mountain coupling. *Petroleum Geology*, 26(2): 169–175 (in Chinese with English abstract)

Zhang PZ. 2008. Present tectonic deformation, strain distribution and deep dynamical process in western Sichuan, eastern Qinghai-Tibet Plateau. *Science in China (Series D)*, 38(9): 1041–1056 (in Chinese)

Zhao GZ, Unsworth MJ, Zhan Y *et al.* 2012. Crustal structure and rheology of the Longmenshan and Wenchuan Mw 7.9 earthquake epicentral area from magnetotelluric data. *Geology*, 40(12): 1139–1142

Zheng RC, Zhu RK, Dai CC *et al.* 2008. Northeastern Sichuan foreland basin Xujiahe basin sedimentary sequence coupling process characteristics. *Acta Geologica Sinica*, 82(8): 1107–1087 (in Chinese with English abstract)

Zheng RC, Li GH, Dai CC *et al.* 2012. Basin-mountain coupling system and its sedimentary response in Sichuan analogous foreland basin. *Acta Geologica Sinica*, 86(1): 170–180 (in Chinese with English abstract)

Zheng Y, Yang YJ, Ritzwoller MH *et al.* 2010. Crustal structure of the northeastern Tibetan Plateau, the Ordos block and the Sichuan basin from ambient noise tomography. *Earth Sci.*, 23(5): 465–476

附中文参考文献

曹俊兴, 刘树根, 徐国盛等. 2011. 龙门山前陆盆地深层海相碳酸盐岩储层地震预测研究. *岩石学报*, 27(8): 2423–2434

李国辉, 李楠, 谢继容等. 2012. 四川盆地上三叠统须家河组前陆大气区基本特征及勘探有利区. *天然气工业*, 32(3): 15–21

- 李立, 金国元. 1987. 攀西裂谷带及龙门山断裂带地壳上地幔的大地电磁测深研究. 物探与化探, 11(3): 161-169
- 李勇, 苏德辰, 董顺利等. 2011. 晚三叠世龙门山前陆盆地早期(卡尼期)碳酸盐缓坡和海绵礁的淹没过程与动力机制. 岩石学报, 27(11): 3460-3470
- 李忠权, 潘懋, 萧德铭等. 2001. 四川盆地拉张-挤压构造环境探讨. 北京大学学报, 22(3): 30-35
- 李忠权, 应丹琳, 李洪奎等. 2011. 川西盆地演化及盆地叠合特征研究. 岩石学报, 27(8): 2362-2370
- 林茂炳. 1996. 初论陆内造山带的造山模式——以四川龙门山为例. 四川地质学报, 16(3): 193-198
- 刘和甫, 夏义平, 殷进垠等. 1999. 走滑造山带与盆地耦合机制. 地学前缘, 6(3): 121-132
- 刘和甫, 汪泽成, 熊保贤等. 2000. 中国中西部中、新生代前陆盆地与挤压造山带耦合分析. 地学前缘, 7(3): 55-72
- 刘树根, 罗志立, 曹树恒. 1991. 一种新的陆内俯冲类型——龙门山型俯冲成因机制研究. 石油实验地质, 13(4): 314-324
- 刘树根, 邓宾, 李智武等. 2011. 盆山结构与油气分布——以四川盆地为例. 岩石学报, 27(3): 621-635
- 宋鸿彪. 1994. 龙门山造山带地质和地球物理资料的综合解释. 成都理工学院学报, 21(2): 79-88
- 王二七, 孟庆任. 2008. 对龙门山中生代和新生代构造演化的讨论. 中国科学(D辑), 38(10): 1221-1233
- 王金琪. 2003. 龙门山印支运动主幕辨析——再论安县构造运动. 四川地质学报, 23(2): 65-69
- 徐锡伟, 邓起东. 1988. 晋北张性区盆岭构造及其形成的力学机制. 中国地震, 4(2): 19-27
- 张进, 马宗晋, 任文军. 2004. 对盆山耦合研究的新看法. 石油实验地质, 26(2): 169-175
- 张培震. 2008. 青藏高原东缘川西地区的现今构造变形、应变分配与深部动力过程. 中国科学(D辑), 38(9): 1041-1056
- 郑荣才, 朱如凯, 戴朝成等. 2008. 川东北类前陆盆地须家河组盆山耦合过程的沉积层序特征. 地质学报, 82(8): 1077-1087
- 郑荣才, 李国晖, 戴朝成等. 2012. 四川类前陆盆地盆-山耦合系统和沉积学响应. 地质学报, 86(1): 170-180