

中生代多向挤压构造作用 与四川盆地的形成和改造

张岳桥^{1,2} 董树文³ 李建华³ 施 炜^{1,2}

(1. 国土资源部新构造运动与地质灾害重点实验室, 北京 100081;

2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 3. 中国地质科学院, 北京 100037)

摘要: 远离活动板块边缘的四川盆地以其周缘复杂分布的褶皱构造带而著称, 这些构造带的成因及其大地构造背景一直是华南大地构造研究的焦点之一。本文基于区域构造编图、褶皱构造样式和叠加变形分析, 论述了四川盆地及其周缘中生代挤压变形特征及其定型时代, 确定了重要构造事件及其产生的构造样式。研究显示, 四川盆地及其周缘地带中生代经历了 3 个重大构造事件, 每个构造事件产生的构造形迹在空间上发生复合和联合, 造就了四川盆地及其周缘复杂的构造组合样式。中晚三叠世碰撞造山事件(印支运动)在扬子地区形成近 W-E 向褶皱构造, 扬子地块西缘伴随着松潘—甘孜褶皱造山带的形成, 发育了龙门山—锦屏山逆冲—推覆构造带及川滇前陆盆地, 奠定了川—渝—黔—滇大型沉积盆地, 构成四川盆地的原形。中晚侏罗世时期(燕山早幕), 东亚构造体制发生重大变革, 来自北部、东部、西部和南部的板块多向汇聚导致了大陆多向汇聚构造体系的形成和发展, 其中秦岭造山带的再生活动导致南部米仓山—大巴山前陆构造带的形成和发展; 来自太平洋板块向西推挤, 导致了川东地区 NW 向突出的弧型构造和川南华蓥山帚状构造的形成; 羌塘地块的向东侧向挤出, 在扬子地块西北缘发生褶皱逆冲变形(龙门山—锦屏山构造带)。这期多向挤压事件强烈改造了四川 T₃-J₁₋₂ 原形盆地, 周缘褶皱构造带基本定型。早白垩世晚期的挤压事件(燕山晚幕)进一步改造了四川盆地, NW-SE 向构造得到加强。除了西缘以外, 四川盆地其他周缘褶皱构造带主体定型于晚侏罗世的陆内造山作用阶段, 是扬子克拉通周边造山带在周邻板块多向汇聚作用下引发的再生复活的结果, 成为中国东部陆内汇聚构造体系的重要组成部分。

关键词: 四川盆地; 薄皮构造; 中生代; 多向挤压; 盆地改造

中图分类号: P542

文献标志码: A

文章编号: 1000-3657(2011)02-0233-18

四川盆地是在扬子克拉通台地基础上形成和发展起来的复合型或叠合型盆地, 经历了漫长的地质演化历史。盆地的基底由前震旦系变质地层组成, 经历了中元古代(1.8~1.0 Ga)多次地壳增生作用, 最终于晋宁运动(1000~830 Ma)固结^[1-4]。在新元古代时期, 扬子地块周缘发生裂解, 在裂谷地带堆积了一套含火山岩的碎屑沉积, 同时伴随花岗岩的侵位^[5-6](同位素年龄 830~820 Ma); 在扬子地块的西缘、西北缘和北缘也发生了张裂, 发育了一套 820~800 Ma 的双峰式火山岩和 A 型花岗岩^[5,7,8], 被动陆缘由此形

成。自震旦纪至早中三叠世, 整个扬子地块以升降运动占主导, 发育一套巨厚的, 以碳酸盐岩、泥岩、砂岩、蒸发岩等为主的台地相和大陆边缘相沉积^[9]。发生于早古生代晚期的加里东运动深刻影响了扬子地块古构造和古地貌格局, 盆地中央大型古隆起由此形成。泥盆—石炭系主要发育在扬子地块的周缘地区, 在中部隆起地区缺失。受到中特提斯洋扩张的影响, 扬子地块西部地带在晚二叠世发生强烈的伸展裂解, 诱发了广泛的玄武岩喷发。早期有学者把这次事件称为峨眉地裂运动^[10], 近期研究结果认为与地

收稿日期: 2010-08-18; **改回日期:** 2010-11-24

基金项目: 国土资源部“深部探测技术与实验研究”专项(SinoProbe 08-01)资助。

作者简介: 张岳桥, 男, 1963 年生, 博士, 研究员, 构造地质学专业; E-mail: zhangyueqiao@yahoo.com。

幔柱活动有关^[11]。早、中三叠世的扬子地块古地貌格局表现为中部为陆、四周为洋^[12-14]。

发生在中三叠世晚期的印支运动对扬子地块的演化具有划时代的意义。一方面,扬子地块顺时针旋转导致中特提斯洋(秦岭洋)的剪刀状闭合^[15-22],并与华北地块的碰撞和陆-陆深俯冲作用,导致中央造山带的形成和大别-苏鲁超高压变质带的快速折返^[23-25];另一方面,受到金沙江洋的向东俯冲和增生造山作用的影响,松潘-甘孜“地槽”褶皱造山,增生到扬子地块的西部边缘^[26]。同时位于印支半岛的Sibumasu地块与印支地块碰撞,一同增生到扬子地块的南缘^[27]。印支期碰撞造山作用改变了亚洲大陆的古构造格局,扬子地块的沉积-构造面貌发生了

飞跃式的变革,从古生代的台地相沉积演化为晚三叠世-侏罗纪的陆相盆地沉积,这个陆相沉积盆地作为现今四川盆地的原型,其展布范围要大很多^[28]。自中晚侏罗世以来,受到东亚多板块汇聚体制的影响,中国大陆进入到陆内造山和陆内变形的演化时期^[29],早期碰撞造山作用形成的原形盆地受到强烈改造,盆地四周发生不同程度的逆冲和褶皱变形,现今的四川盆地格局逐渐形成。

与其他克拉通盆地相比,四川盆地的最大特点是其盖层的强烈褶皱和受到不同方向构造挤压变形的改造,在其周缘形成了复杂的弧形褶皱构造带(图1)。随着海相地层油气勘探的进展,对四川盆地的研究也越来越深入,不同学者分别从不同方面对盆地

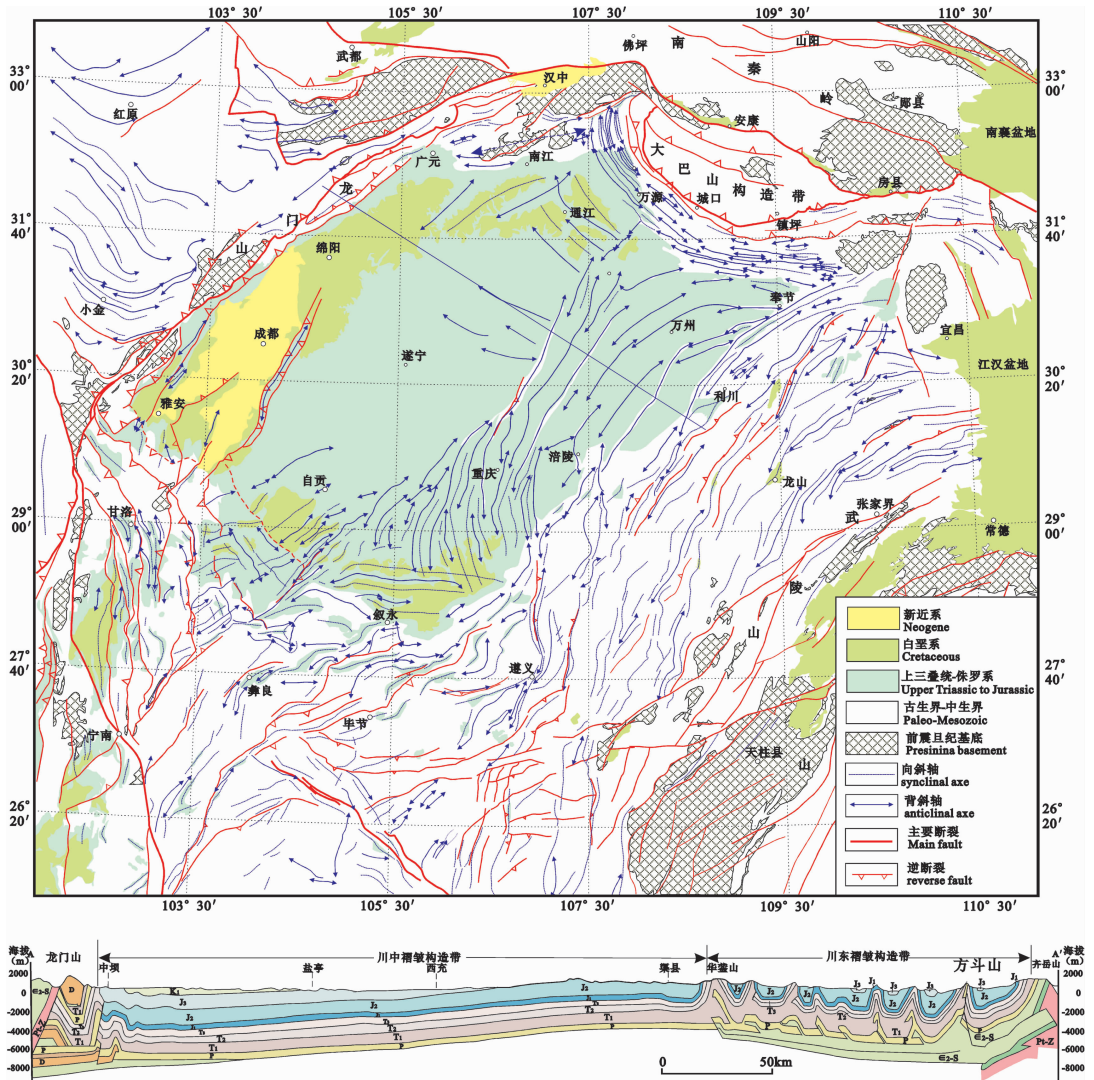


图1 四川盆地及其周缘地带构造纲要图
Fig.1 Structural outline of the Sichuan basin and its adjacent areas

进行了详细的论述^[30-33]。但前人的研究多集中在建造方面(地层、岩相、古地理等),对构造变形改造和构造带之间的关系研究相对较少^[34],对四川盆地复杂褶皱构造带的复合、联合和叠加关系以及定型时代的研究则更少^[35],从而对盆地构造演化历史及其动力学过程存在不同的诠释和认识。对于改造盆地的油气勘探,构造带定型时代研究是油气勘探部署的重要环节,是决定油气勘探方向的基础。本文正是基于这样一个思路,对四川盆地周缘地带褶皱构造变形样式和叠加关系进行分析,从构造变形对盆地改造的角度和构造联合、复合的关系,论述中生代构造挤压事件对四川盆地的形成和改造,从而揭示盆地演化的运动学和动力学过程,以期抛砖引玉。

1 区域断裂与褶皱构造分区

现今四川盆地的轮廓可以通过晚三叠世—早侏罗世地层分布范围来大致圈定,这样确定的盆地被四周造山构造带和深大断裂所围绕(图 2)。盆地的西侧为著名的龙门山—锦屏山断裂带,将四川盆地与松潘—甘孜褶皱造山带分隔。四川盆地北缘为米仓山—大巴山前陆构造带,构造形态非常不规则,由 NEE 向的米仓山隆起带和向南西凸出的大巴山弧形构造带组成,这两个构造带将四川盆地与秦岭造山带分隔,其中汉中—安康断裂可能是南秦岭造山带和扬子地块的边界断裂。盆地的东南地区为宽阔展布的逆冲—褶皱构造带,扬子地块的东南边界位于武陵山—雪峰山基底隆起带,它分隔了扬子地块和华夏地块(华南加里东褶皱造山带)。四川盆地南部边界显示弥散特征,形态不规则,构造组成复杂,走向延伸不连续。西南地区发育大凉山逆冲—褶皱带,该带西南边界为安宁河—则木河—小江断裂带。

除了上述周缘造山带和主要深大断裂以外,在扬子地块内部发育两条重要的 NNE 向区域性大断裂,由西到东是:华蓥山断裂带和齐岳山断阶带。这两条断裂将扬子地块分割成 NE 向条块,每个条块的褶皱构造样式截然不同。从西到东分别命名为:川中褶皱构造带、川东褶皱构造带、川—鄂—渝—黔褶皱构造带(图 2)。

位于齐乐山断阶带以东的川—鄂—渝—黔褶皱构造带,又以 N-S 向的遵义断裂和 NW-SE 向的紫云—罗甸断裂为界,将该带进一步划分为鄂—渝—黔褶皱构造带和黔中褶皱带,每个构造单元的褶皱

构造样式存在明显的差异。

一些主要断裂带的基本特征简述如下:

华蓥山断裂带是扬子地块内部的一条重要的基底边界断裂,NE-SW 至 NNE-SSW 走向,地表主要表现为一系列 NE-SW 向右阶排列的线性褶皱。断裂两侧盖层褶皱方向和样式截然不同。航磁资料显示,断裂带南西延伸进入南部断褶带,终止在南北向的小江断裂带上,向北东延伸隐伏于大巴山前陆构造带之下。从褶皱构造样式特征推断,该断裂带以挤压逆冲为主,兼有右旋走滑分量,经历了多期次的构造活动,主要活动时期发生在中晚侏罗世,并在白垩纪、新生代时期有不同程度的走滑复活。

齐岳山断阶带位于四川盆地的东缘,成为西部隔档式褶皱和东部隔槽式褶皱的分界。该断阶带地表表现为一系列的背斜构造,深部可能对应三角带,由一系列东倾的基底逆冲断片垛堆构成。断阶带南西延伸似乎终止在南北向的小江断裂带上,向北东消失在神农架隆起的南缘。

紫云—罗甸断裂带由一束 NW-SE 向延伸的断裂和断层相关褶皱组成,向 NW 延伸于镇宁地区终止在齐岳山断阶带,向 SE 一直延伸到十万大山盆地(图 3)。该断裂带的边界性质非常清楚,其 SW 侧为南盘江盆地,其中的褶皱构造整体呈弧形,弧顶向北凸出。NE 侧为黔桂台拗区,古生界发育完整,构造样式以一系列 N-S 向褶皱为特征,靠近罗甸断裂带褶皱轴向转为 NW-SE 向,与断裂带平行。根据断裂带控制的地层和褶皱构造特征分析,该断裂带中晚三叠世处于引张伸展状态,与南盘江盆地的拉开有关,逆冲构造变形发生在中晚侏罗世,伴有左旋走滑运动分量,并控制了断裂带两侧的褶皱构造样式^[36]。

遵义断裂带是一条由南北向狭长展布的紧闭向斜和背斜构造所显示的基底断裂带,是黔中地区南北向褶皱束的重要组成部分。断裂向南终止在 NW 向紫云—罗甸断裂带,在中段被一组近 W-E 向、NE 向断裂所切割。断裂两侧的褶皱方向和样式存在很大差异,表现为东部以南北向隔槽式褶皱为特征,而西部褶皱方向不规则,样式变化较大。由此推测,该断裂带可能是一条边界性基底断裂,控制了盖层中褶皱构造样式。

城口—房县断裂带发育于四川盆地北部大巴山地区,是一条重要的基底边界断裂,它构成了南、北

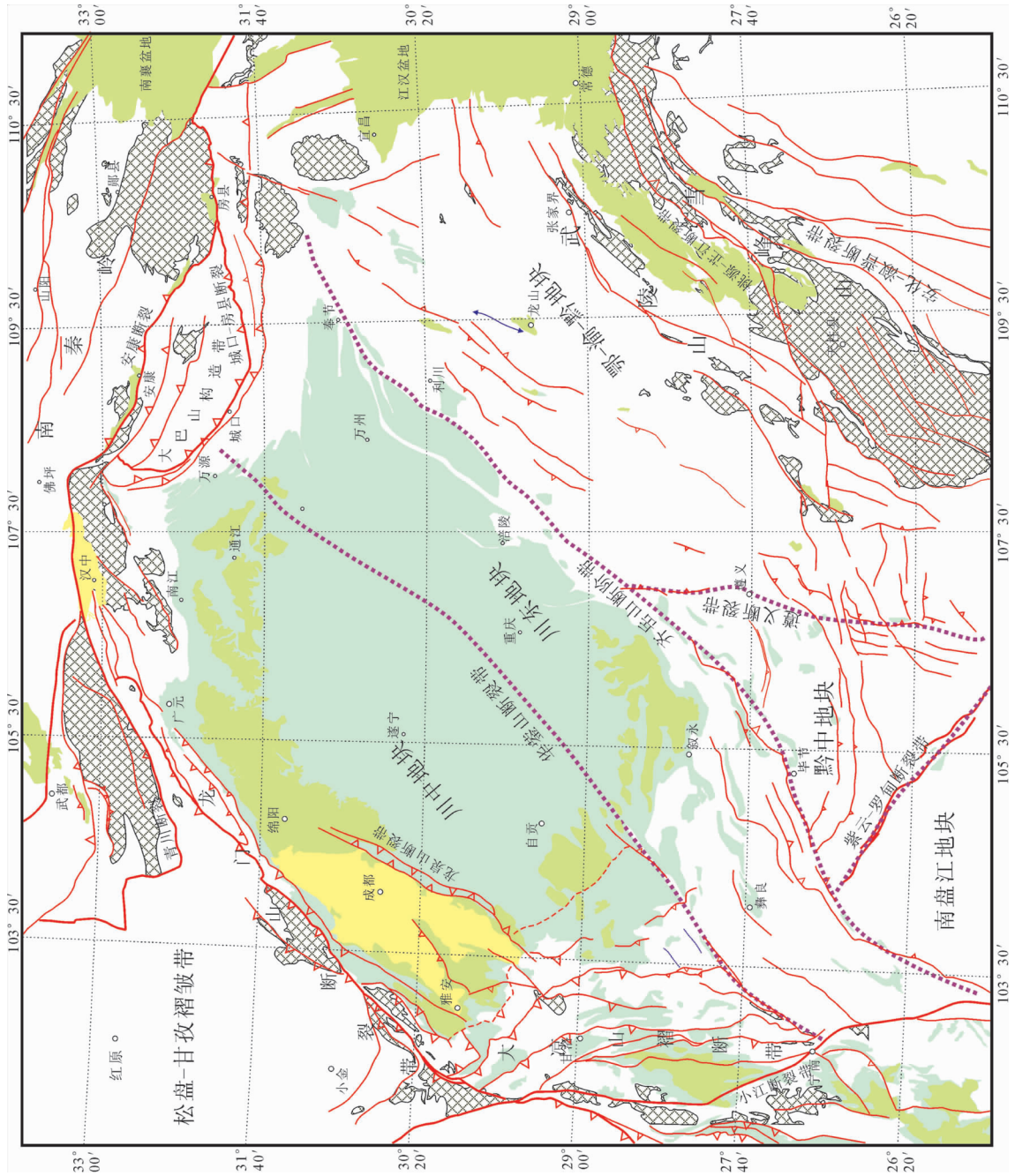


图 2 四川盆地及其周缘地带基底分区简化图 (图例同图 1)
 Fig.2 Simplified map showing main structural units of the Sichuan basin and its adjacent areas (legends as for Fig.1)

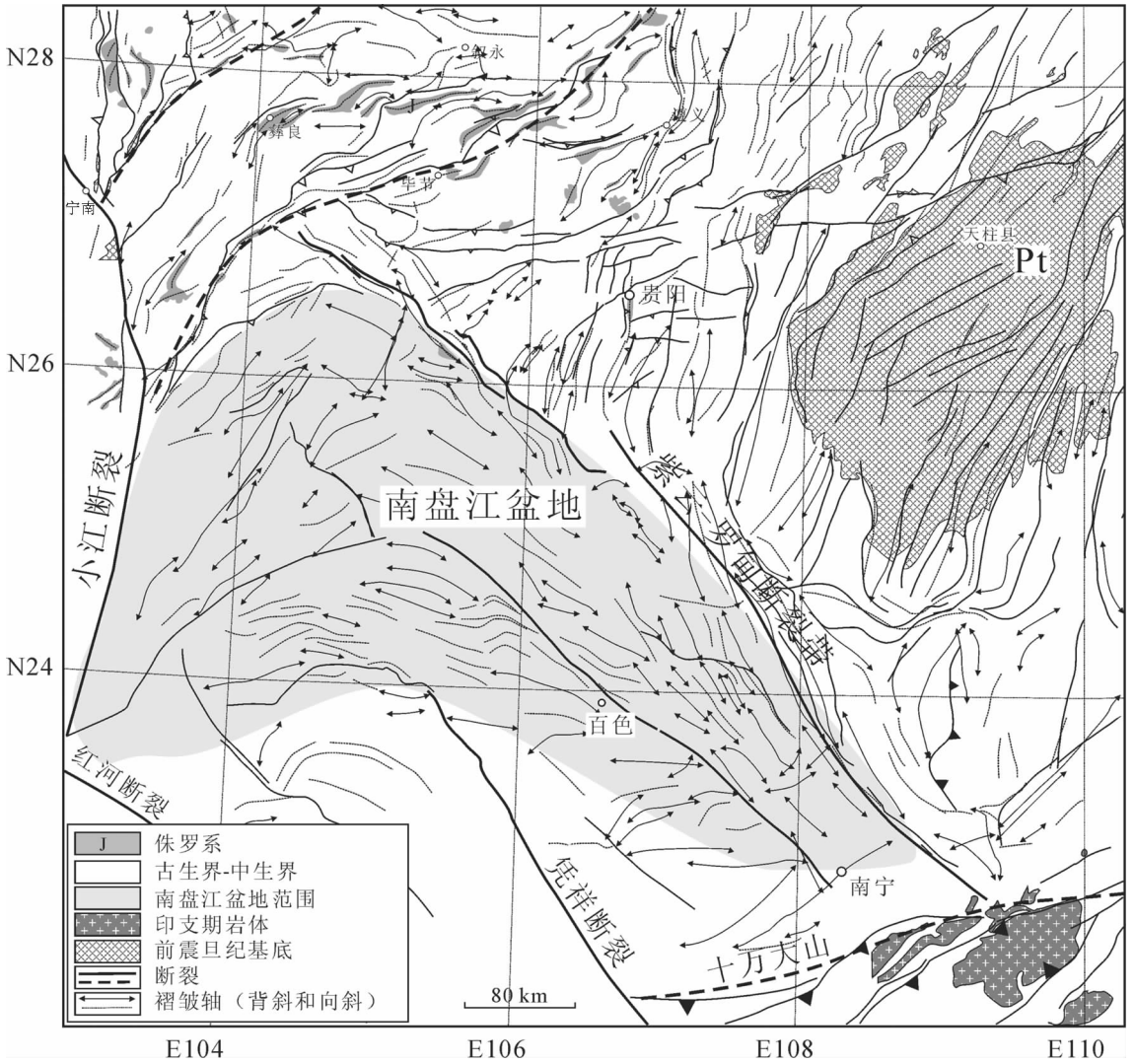


图 3 紫云—罗甸断裂带构造图

Fig.3 Structural map of the Ziyun-Luodian fault zone

大巴山构造带的分界断裂,总体呈弧型分布。北大巴山 NW-SE 向逆冲-褶皱构造线被该弧型断裂带高角度相截切,南大巴山弧型褶皱带几乎与之平行。城口—房县断裂带不仅是前、后大巴山构造变形的分界断裂带,同时也控制了造山作用之前的沉积岩相古地理环境^[7]。后大巴山发育密集的火岩岩脉,大多顺层发育,也有切层的,以中基性、碱性岩脉为主,时代跨越了震旦纪到整个早古生代。这些岩脉严格终止在城口—房县断裂带,沿前陆带没有岩脉发育。因此,这是一条继承性的边界断裂带,它的形成和发展伴随着整个大巴山地区的地质构造演化历史。

野外调查和构造测量结果显示,该断裂带以挤压逆冲活动为主,根据断层滑动矢量反演的构造应

力场指示最大水平主压应力方向与断裂带垂直,整体呈发散状分布^[8]。断裂带演化伴随大巴山构造带的发展而发展,同时控制了大巴山构造带演化的差异。研究表明,该断裂带经历了 3 个演化阶段:古生代伸展大陆边缘和断裂弧的初始形态;中晚三叠世大陆碰撞造山作用和断裂带逆冲作用;中晚侏罗世陆内造山作用和弧型构造的定型。

安宁河—则木河—小江断裂带:扬子地块西南地区的一条重要的基底断裂带,也是一条现今强烈左旋走滑活动断裂带,总体呈南北走向。该断裂带东西两侧的基底性质可能不同,导致了构造变形样式的差异。华蓥山断裂带和齐岳山断阶带均终止在该断裂带一侧。

2 褶皱构造样式与定型时代分析

2.1 川东褶皱构造带

夹于华蓥山断裂带和齐岳山断阶带之间的褶皱构造带是中国大陆上典型的隔档式褶皱^[39],南北段褶皱样式存在很大差异(图4)。北段重庆—万州地区,典型的隔档式褶皱,深部存在多个滑脱面,主要位于寒武系底部泥岩层、志留系泥页岩层和下中三叠统膏盐层^[38]。该段是川东北弧型构造的组成部分,弧顶由NE向背斜组成,西翼由近N-S向褶皱组成,向北东收敛于秭归盆地。

重庆以南,沿华蓥山断裂带发育的NE褶皱转为N-S向,向南发散,组成帚状型构造,这种构造型式指示华蓥山断裂右旋走滑运动。这组褶皱向南延伸被一组W-E向褶皱所叠加。目前对这两组褶皱的叠加关系和深部构造形态,文献上报道很少。笔者注意到,W-E向褶皱西延至华蓥山断裂带时,发生转弯,与断裂带平行,表明W-E向褶皱构造形成时,华蓥山断裂带显示左旋走滑活动。另外,W-E向褶皱向东延伸受到NE向齐岳山断阶带的限制,因此,卷入白垩系的W-E向褶皱发育局部。

再往南进入盆地南缘隆起区,以隔槽式褶皱为特征,由3排NE-NNE向斜带组成,西排沿华蓥山断裂带南段发育,中排沿彝良、叙永一带发育,东排沿齐岳山断阶带发育,向南西被小江断裂所切。该段叠加有W-E向褶皱构造。

2.2 川—黔—渝—鄂褶皱构造带

该褶皱带位于齐岳山断阶带以东、雪峰山基底隆起以西地区,是中扬子褶皱构造带的组成部分。总体上,褶皱构造以隔槽式向斜为主要特征,向斜核部残留晚三叠世—早中侏罗世陆相地层,其上被早白垩世砾岩层不整合覆盖,指示褶皱构造主要定型于中晚侏罗世的燕山运动早期。构造平衡剖面分析推测该带存在多个滑脱面,主要滑脱面发育在寒武系和志留系泥岩层中,底部滑脱面位于中地壳的变质基底中^[39-42],从构造组合特征看,该区褶皱构造构成一个不对称的弧型构造(图4),弧顶位于川东褶皱带,由NE-SW向展布的隔档式褶皱构造组成,呈扁平状突向NW;弧的西翼由4条NNE-NS向隔槽式褶皱组成,这些构造向南终止在NW-SE向紫云—罗甸断裂带,向北转为NE向;弧的东北翼发育不全,由NEE-WE向褶皱组成,向东隐伏在江汉盆

地新生代沉积物之下,向北与大巴弧联合;弧的内核部分位于武陵山、雪峰山一带,出露前泥盆纪变质基底。为了叙述方便起见,笔者将这个弧型构造命名为雪峰山弧型构造。

与大巴前陆弧形构造带不同,雪峰山弧总体形态不规则,其形成受基底构造的制约,因而属于限制型弧型构造。川—黔—渝—鄂褶皱区的N-S向隔槽式褶皱受制于基底一组南北向破裂带,早期东西向伸展控制了晚二叠世—三叠纪的沉积,于中晚三叠世发生挤压褶皱,形成隔槽式褶皱构造。该组褶皱向北延伸或转为NE向,或与川东隔档式褶皱相连,构成弧型构造。褶皱卷入的最新地层为侏罗系,其上被白垩系不整合覆盖,指示弧型构造定型于晚侏罗世时期。按照弓箭原理,雪峰山弧型构造指示了自南东向北西的挤压作用,动力来自东部。

2.3 川中低缓褶皱构造区

介于龙泉山和华蓥山断裂之间的川中隆起区,地层平缓,变形很弱,以低幅的褶皱构造为主,方向散乱,断层较少^[43]。靠近南北两端的前陆带发育几组褶皱构造。南部自贡地区,发育一组NE-SW向褶皱,平行华蓥山断裂带,以短轴褶皱为主,卷入的最新地层包括侏罗系和下白垩统陆相地层,推测褶皱形成的时代在早晚白垩世之交。中部地区发育一组NWW-SEE向褶皱,褶皱幅度较小,受到东侧华蓥山断裂的限制,底部滑脱面位于早中三叠世的膏盐层。

北部地区沿米仓山—大巴山前陆凹陷带,发育三组叠加褶皱,一组走向NE-NNE,以黄金口背斜为代表,是华蓥山基底断裂的地表表现;另一组NWW-SEE向褶皱,以涪阳坝背斜为典型,卷入最新地层为下白垩统,地震剖面揭示其底部滑脱面位于早中三叠世的膏盐层,该组褶皱明显受到了东侧华蓥山断裂的限制;还有一组走向NE-SW,以通南坝背斜为典型,发育在米仓山前陆凹陷区,褶皱构造相对宽缓,整个盖层和震旦纪地层卷入了褶皱,推测底部滑脱面位于前震旦纪变质基底中。根据褶皱叠加关系和深部协调性分析,NWW-SEE向褶皱早于NE-SW向褶皱,但晚于NE-NNE向褶皱。

综上所述可以看出,川中地区发育3个世代的褶皱构造,从老到新分别为:NE-NNE、NWW-SEE、NE-SW。这些褶皱构造主要形成于白垩纪—早新生代时期的构造事件。

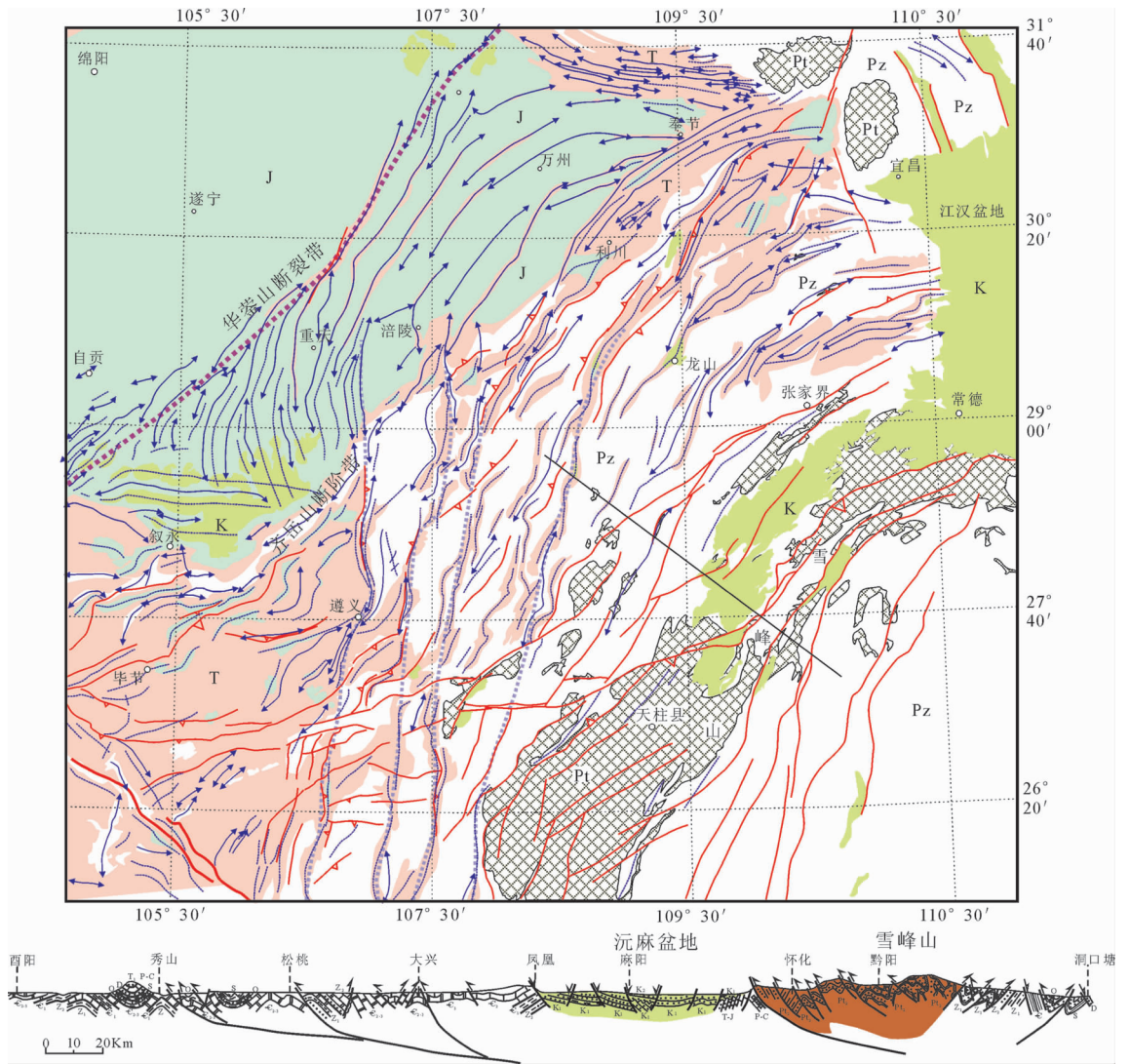


图 4 川东地区褶皱构造型式与雪峰山弧型构造及其构造剖面图
(构造横剖面根据文献[43-44]修改)

K—白垩系;J—侏罗系;T—三叠系;Pz—古生界;Pt—元古宇

Fig.4 Folding structural pattern in east Sichuan and the Xuefengshan orocline structure and its structural cross section (cross section modified after references [43-44])

K—Cretaceous; J—Jurassic; Y—Triassic; Pz—Palaeozoic; Pt—Proterozoic

2.4 川西前陆褶皱带和前陆凹陷带

川西前陆褶皱带对应于龙门山逆冲构造带,主体由 3 条断裂及其所夹的逆冲块体组成,这 3 条断裂分别为:后山断裂带(茂—汶断裂带)、中央断裂带(映秀—北川断裂带)、山前断裂带(或安县—灌县断裂带)(图 5)。龙门山构造带的基底和盖层发生多层次的拆离,形成推覆体、逆冲断片和飞来峰构造,最著名的推覆体构造发育在龙门山北段,可见由古生代碳酸盐岩地层组成的仰天窝—唐王寨向斜,在其

南西端叠置在由中生代地层组成的向斜构造之上,推覆距离至少在 20~30 km。在其前陆地带,形成典型的叠瓦状构造,其上被晚中生代陆相地层所超覆。沿龙门山中南段,中央断裂带的逆冲作用使扬子地块基底被拆离,并逆冲在晚三叠世陆相地层之上,形成了彭罐和宝兴两个杂岩体。在前陆地带,发育飞来峰群构造,由古生代和早中生代的海相地层组成,漂在强烈褶皱的晚三叠世和侏罗纪地层之上。大多数飞来峰底部滑脱面可能随下部地层发生了褶皱作

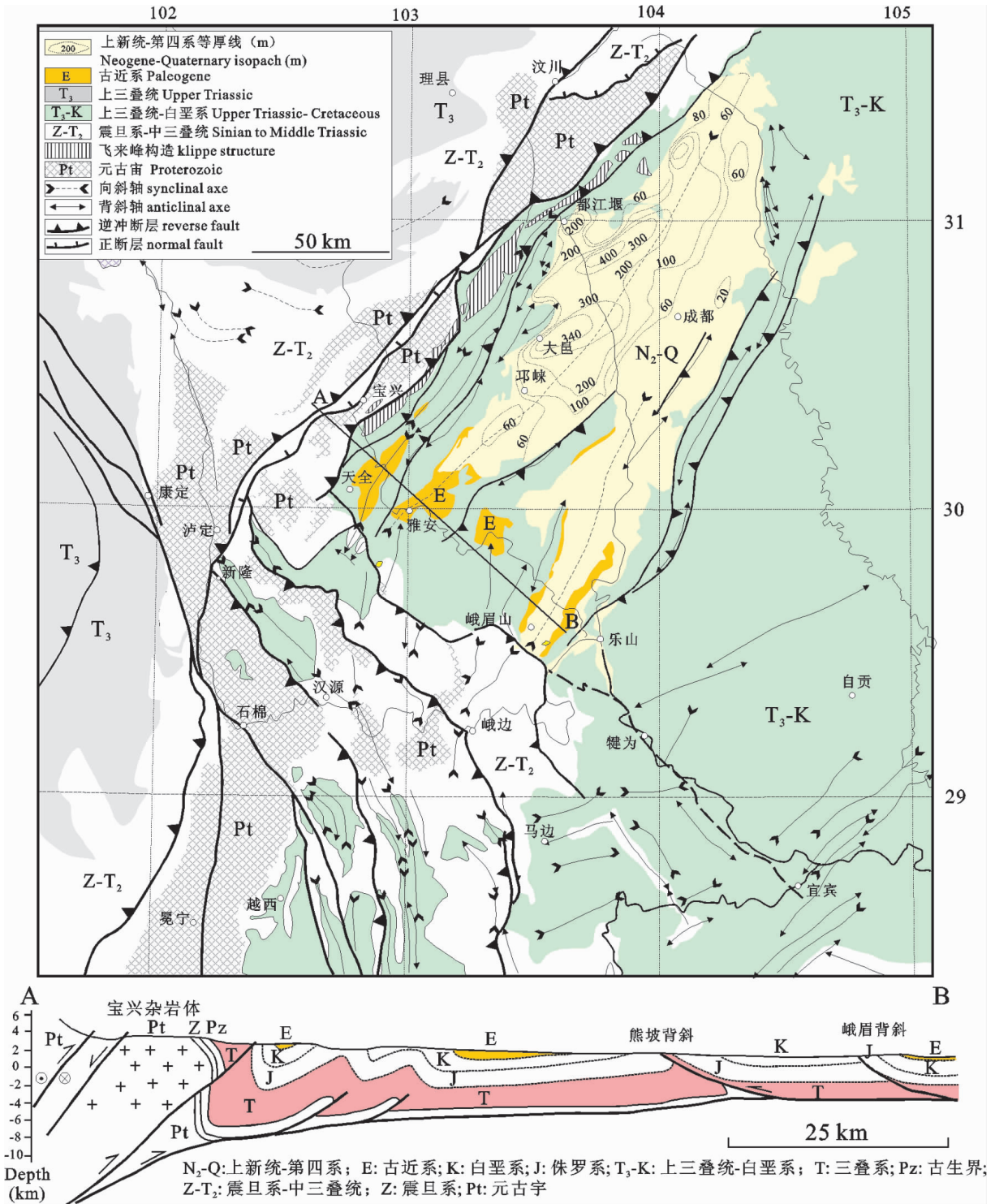


图5 四川盆地西南地区构造纲要图 (构造横剖面根据文献[49]修改)
Fig.5 Structural outline and schematic cross section of the southwest area of the Sichuan basin (cross section modified after reference [49])

用,倾角变得很陡,只有靠近盆地部分,底滑脱面较平缓。许多学者研究者认为,飞来峰的根带可能位于中央断裂带,也有部分学者认为这些飞来峰实际上是从两个逆冲的杂岩体上滑动下来的,是重力滑动的结果^[49]。

在前陆凹陷带,发育一组 NE-NNE 向褶皱构造,在成都平原发育最好,卷入的地层包括白垩系和古近系,底部滑脱面位于三叠系的膏盐层^[47-48],其上被上新世—早更新世的大邑砾岩所超覆,中更新世的雅安砾岩没有褶皱变形,指示前陆凹陷带的褶皱构造形成于中新世晚期至上新世期间的挤压构造事件。

从沉积和构造变形记录可以看出,川西前陆构造带是一个复合型前陆带,诞生于晚三叠世碰撞造山事件,并受到侏罗—白垩纪时期陆内构造事件和晚新生代喜山构造事件的强烈改造^[26,49-50]。

2.5 川西南褶皱带

位于四川盆地西南缘,呈 NW-SE 至 N-S 向展布,形成向东凸出的弧,由一系列西倾的逆冲断裂及其相关褶皱组成,主要逆冲断裂有 4 条:石棉—昭觉断裂、兴龙—汉源断裂、荣县—峨边断裂、犍为—宜宾断裂(图 5)。西界位于安宁河—则木河—小江断裂带,南界被华蓥山断裂所限制。该褶皱带卷入的最新地层为晚白垩世—古新世,主要残留在菱形状的西昌盆地,表明该断褶带主要遭受晚新生代构造作用^[51]。在其前陆地带,残留一套晚白垩世—古新世砂砾层,沿四川盆地西南缘分布,可能与该褶皱带的发育有关。

叠加褶皱发育于靠近前陆的断阶带,夹于荣县—峨边断裂和犍威—宜宾断裂之间的亚带中,该带中发育 3 组鼻状褶皱构造:一组走向 NE-SW,平行于华蓥山断裂带,被 NW-SE 向犍威—宜宾断裂切割;一组走向 NW-SE,以大渡河鼻状褶皱为典型^[51],平行于犍威—宜宾断裂;还有一组走向 NE-NNE,与龙泉山断裂带平行。按照叠加和切割关系,这 3 组褶皱构造的形成次序从早到晚分别为:NE-SW, NW-SE, NE-NNE。这个序列发展与区域断裂带之间的形成序列是一致的。

该褶皱带向西北方向被 NE 向龙门山断裂带所截切,说明其形成发生在龙门山断裂带之前。在前陆地带,白垩系—古近系已卷入到 NE-NNE 向褶皱构造,上新世大邑砾岩层也卷入到 NE-NNE 向构造带中,表明川西前陆带的定型时代在晚新生代,即中新世晚期至早更新世时期。笔者推测,川西南弧型

褶皱带主要定型于古近纪—新近纪之交的构造事件。这次事件使鲜水河断裂带发生强烈的斜向逆冲,在其东端转折端发生地壳重熔和岩浆侵入^[52]。

2.6 川北前陆构造带

由 NEE-WE 向的米仓山构造带和弧顶向南西凸出的大巴山前陆弧型构造带组成,这两个前陆构造带在交汇处发生叠加,形成大陆构造典型的横跨叠加褶皱构造^[53-55](图 6)。

米仓山构造带整体上是一个卷入基底的双式背斜,核部出露新元古界变质岩系,其上被震旦系海相地层不整合覆盖,其中缺失泥盆系和石炭系。背斜北翼卷入的最新地层为三叠系,由一系列背斜和向斜组成,通过 NEE 向的白沔峡断裂与汉南地块相连;背斜南翼中生代地层连续沉积,其中上三叠统和下侏罗统是一套砾岩层,构成了米仓山前陆盆地。米仓山复背斜与前陆拗陷之间为一逆冲断阶带和反冲三角带,受一组向南逆冲的断层控制^[56]。研究显示,米仓山构造带主体形成于中晚三叠世印支运动时期,是秦岭碰撞造山带的前陆构造带,在中晚侏罗世时期,又强烈挤压复活和快速隆升。

大巴山前陆带是一个大型的弧型构造带,由一系列褶皱和逆冲断裂组成,主体围绕城口—房县弧型断裂带分布。以镇巴—徐家坝—阳日断裂带为界,将前陆弧型构造带分为基底拆离带和盖层滑脱带 2 个亚带(图 6)。基底拆离带西窄东宽,卷入的最老地层为新元古代碳酸盐岩,最新为三叠系海相地层,在城口附近残留有晚三叠世—早侏罗世陆相地层。该带由一系列相互穿插的逆冲断层和断层相关褶皱组成,平面分布上总体平行于城口—房县断裂带或与之小角度斜交,构造样式以逆冲断片的堆叠为主,断层主体向北东陡倾,将震旦系白云岩逆冲在二叠系灰岩之上,单条断距可达千米。推测底部拆离面位于新元古代变质岩中。盖层滑脱带由一系列紧闭的线性褶皱构造组成,卷入的最老地层为寒武系,最新地层为下中侏罗统。该带横向分布较稳定,宽度在 40 km 左右。褶皱构造样式总体呈隔档式,即背斜紧闭,向斜宽缓,但在中段和东段,这种特征不明显。推测底部滑脱层位于寒武系泥页岩中。

研究表明,大巴山弧型构造带是一个复合型前陆构造带^[57],弧型带的定型经历了两个造山阶段的演化历史:中晚三叠世印支期碰撞造山作用和中晚侏罗世陆内造山作用。印支碰撞造山作用导致后大

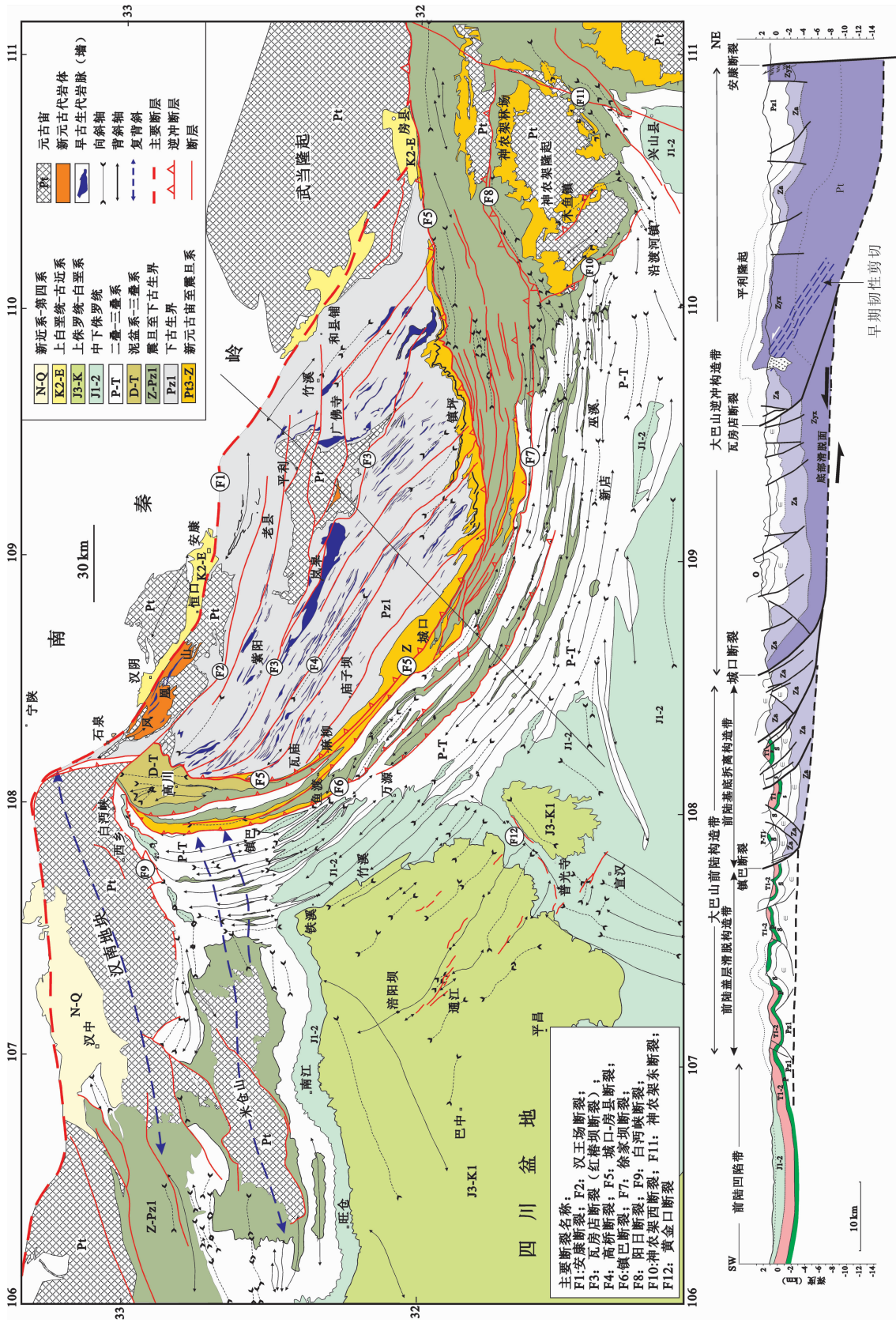


图6 四川盆地北缘米仓山—大巴山构造纲要和构造横剖面图^[38]
 Fig.6 Structural outline of the Micangshan-Dabashan tectonic belt along the northern margin of the Sichuan basin and structural section across the Daba Mountain^[38]

大巴山推覆构造带的形成;中晚侏罗世陆内造山作用使后大巴山逆冲推覆带向前陆方向运动,最终导致大巴山前陆弧型构造带的形成。这种形成历史可以从地层接触关系和构造变形样式上来推断。在北大山推覆体后缘带,沿瓦房店断裂带,残留的晚三叠世—侏罗纪黑色、灰黑色砂砾层不整合覆盖在志留系砂板岩之上。在城口附近,晚三叠世—侏罗纪砂砾岩不整合覆盖在中生代地层之上。从构造变形样式上看,后大巴山逆冲构造带出露基底韧性剪切带,拉伸线理和运动学指向指示上盘向南西方向逆冲。从弧型构造带时间发展角度看,中晚三叠世的碰撞造山导致了后大巴山逆冲构造带的形成,同时使前陆地区的基底拆离带具备了雏形;而中晚侏罗世陆内造山作用不仅导致后大巴山逆冲构造带的复活,前陆盖层滑脱带相继形成。叠加褶皱构造分析结果清楚地显示,前陆弧型带盖层滑脱构造亚带的形成晚于米仓山近东西向构造带。前陆弧型褶皱构造带形成之后,于前陆凹陷带又相继叠加了 NNE、NWW、NEE 向褶皱构造。早中侏罗世地层碎屑岩磷灰石裂变径迹测年和热历史模拟结果显示,大巴山前陆弧形构造带在 155~95 Ma 期间经历了快速抬升冷却(1.0~1.9°C/Ma)过程^①,指示前陆带褶皱隆升起始于晚侏罗世,并持续到早白垩世^[58]。

3 讨论

3.1 中生代主要挤压构造事件及其对盆地的改造

四川盆地是一个构造复合改造型克拉通盆地,经历了多期次、不同性质的构造变动事件。不同构造事件不仅导致了原形盆地的形成和改造,同时在盆地周缘产生了不同类型和样式的褶皱构造,它们之间的叠加、复合和联合,造就了现今复杂的构造形变图像。识别这些构造事件及其产生的构造形迹,成为重塑该地区中生代大地构造发展过程的关键。基于盆地周缘地层和构造变形的记录,笔者识别了四川盆地中生代发展演化过程中 3 个重大构造事件(表 1)。

3.1.1 中晚三叠世碰撞造山作用与四川原形盆地的形成

前人对印支造山事件研究较为详细。这次造山事件发生的构造背景是扬子地块和华北地块沿秦岭的碰撞、金沙洋的俯冲、印支地块与扬子地块的碰撞

与增生等。位于四川盆地北缘的米仓山—大巴山构造带作为秦岭造山带前陆而初具雏形;扬子地块西部大陆边缘增生造山导致了松潘—甘孜造山带的形成,四川盆地西缘龙门山—锦屏山逆冲构造带初具轮廓。扬子地块南缘沿现今的红河断裂带和宋马断裂带同样发生地块碰撞与增生作用。因此,围绕扬子地块北缘、西缘和南缘的印支造山作用彻底改变了扬子地块沉积环境和大地构造面貌,川—滇前陆盆地由此发育,典型的前陆盆地沉积建造保留在四川盆地西缘龙门山前山构造带,其中发育了数千米厚晚三叠世含煤类磨拉石沉积^[52]。早中侏罗世的沉积范围进一步扩大,覆盖了整个扬子地区,但沉积—沉降中心仍然位于现今四川盆地区。这个侏罗纪沉积盆地称为川—渝—黔—滇盆地,它构成了四川盆地的原型^[28]。

3.1.2 中晚侏罗世多向挤压事件及其对四川原形盆地的改造




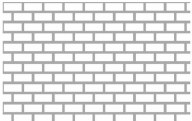
早、中侏罗世是一个构造运动相对稳定的时代,在四川原型盆地中沉积了一套河湖相沉积地层。自中侏罗世晚期以来,中国大陆构造发展进入了多向板块汇聚和强烈的陆内造山阶段,四川盆地相应地进入了多向挤压变形和盆地改造阶段。这个时期最重要的陆内造山作用发生在盆地北缘的南秦岭地区,北大山逆冲构造带向 SW 方向推挤,导致了大巴山前陆弧型构造带的定型^[55]。同时,受到来自东部俯冲大陆边缘动力作用的远程影响,雪峰山基底隆起强烈逆冲复活,并向扬子地块腹地推挤,导致了川东和川—渝—黔—桂地区的隔槽式—隔档式弧型构造带的发育,该弧型构造带与大巴山弧型构造带在川东北发生联合作用,形成了向西开口的喇叭型弧型构造^[55]。四川盆地西缘龙门山构造带在这个时期也可能逆冲复活,在山前地带堆积了一套巨厚的晚侏罗—早白垩世类磨拉石砾岩层。这期多向挤压变形强烈改造了晚三叠世—早中侏罗世盆地原形,奠定了盆地的主体构造—地貌轮廓,盆地中主要基底断裂均发生不同程度的复活,并控制了盖层褶皱构造样式。

对这期多向挤压变形发生的时限,由于缺乏年代学数据而难以精确确定,同时,由于四川盆地周缘陆内挤压变形均表现为薄皮构造样式,前陆拗陷不

①许长海,周祖翼,常远,等.大巴山弧形构造带形成与两侧隆起的关系:FT、(U/ThHe)低温热年代约束.中国科学(D辑),审稿中.

表 1 四川盆地及其周邻地带中生代主要构造事件、盆地演化与大地构造背景一览

Table 1 Mesozoic tectonic events, basin evolution and tectonic setting of the Sichuan basin and its surrounding areas

年龄 Ma	地 层 时 代	主要构造事件	原形盆地与 后期改造	大地构造背景
70	白 垩 纪	 燕山晚期挤压事件	区域隆升与剥蚀	古太平洋板块向NW推挤引起华南内部构造挤压变形, 断陷盆地反转
80			四川改造型盆地	
90				
100	早	 燕山陆内造山作用	川-渝-滇-黔大型沉积盆地 (四川原形盆地)	东亚大陆周邻板块多向汇聚诱发强烈的陆内造山作用, 形成陆内汇聚构造体系, 克拉通盆地遭受强烈改造
110				
120				
130	侏 罗 纪	 印支碰撞造山作用	峨眉山地裂运动	扬子地块与华北地块碰撞, 秦岭造山带、松潘-甘孜褶皱造山带形成; 印支地块与扬子地块碰撞
140				
150				
160	晚	 碳酸盐岩台地		
170				
180				
190	早			
200				
210				
220	三 叠 纪			
230				
240				
250	中			
260				
270				
280	晚			
290				
290	二 叠 纪			

发育。因此只能根据褶皱带地层时代和地层接触关系来大致推断。在川东地区,胡召齐等^[59]根据褶皱构造带卷入的地层和不整合关系, 确定了川东侏罗山式褶皱构造带形成的时代为晚侏罗世, 早白垩世砂砾岩层不整合超覆在不同时代的褶皱地层之上。本文作者在雪峰山沅麻盆地的东缘野外调查发现, 二叠纪灰岩向西逆冲在晚三叠世—早侏罗世砾岩层之上, 其上被早白垩世地层不整合覆盖, 指示这次逆冲事件发生在晚侏罗世。在四川盆地北缘的大巴山地区, 基底剪切带 Ar-Ar 同位素测年揭示了 2 期冷却

事件: 早期发生在晚三叠世至早侏罗世 (年龄在 189~222 Ma), 晚期发生在晚侏罗世 (年龄在 161~166 Ma)^[60], 晚期冷却事件清楚地记录了晚侏罗世大巴山造山作用^①。在四川盆地西缘地带, 早燕山造山事件的直接证据是沿山前发育一套巨厚的晚侏罗世—早白垩世类磨拉石沉积建造, 记录了盆地西部松潘—甘孜造山带的再生活动。

3.1.3 早、晚白垩世之交的构造挤压事件

在中国东部, 早、晚白垩世之交发生一期构造挤压事件, 使华南地区早白垩世断陷盆地普遍发生构

① 李建华, 张岳桥, 董树文, 等. ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology of the ductile shear zone along the northern boundary of the Dabashan tectonic belt. Acta Geologica Sinica, 审稿中.

造反转和宽缓褶皱,尤其在盆地的边缘,地层挠曲变形强烈^[61]。这次挤压事件对四川盆地影响相对较小,白垩纪地层变形相对较弱,但也产生了几组方向的褶皱构造。根据叠加关系分析,笔者认为川南东西向褶皱和川中 NE 向褶皱可能形成于这次构造事件,沿华蓥山断裂带发育的褶皱构造可能主要形成于这次构造事件。这次挤压事件的作用力可能来自不同方向,川南地区近 N-S 向挤压可能主要受到来自南盘江褶皱构造区的影响,而其他大部分地区受到 NW-SE 向挤压。

3.2 晚侏罗世弧形褶皱构造带形成的大地构造背景

从上述分析可知,环绕四川盆地发育的晚侏罗世弧形褶皱构造带以其薄皮构造样式和弥散分布特征而著称。无论是否卷入前震旦纪变质基底,其构造样式均表现为基底和盖层的滑脱,没有下地壳卷入,没有岩浆活动。这种薄皮构造样式已为油气勘探和深部地球物理测深资料所证实^[47,62]。这种构造样式在本质上属于前陆构造性质,它们的形成与周缘造山带的再生活动有关,这些造山带主体形成于三叠纪印支造山运动时期。北部米仓山—大巴山前陆构造带与秦岭造山带的再生活动有关;西部龙门山—锦屏山构造带与松潘—甘孜褶皱造山带的再生活动有关;东部川东褶皱带和川—黔—渝—鄂褶皱带与雪峰山造山带的再生活动有关;南部的褶皱构造可能来自印支地块的挤压作用。

从褶皱构造定型时代分析,除了盆地西缘和南缘地区受到新生代构造变动的强烈影响外,盆地其他周缘褶皱构造带主体形成于中晚侏罗世的陆内造山作用阶段(即燕山早幕),如盆地北缘的米仓山—大巴山褶皱构造带、盆地东部的川东褶皱带等。这个阶段的显著特点是亚洲大陆周邻板块的多向汇聚,其产生的远程效应引发了东亚大陆腹地古老山脉的强烈复活,发生陆内造山作用或再生造山作用,形成了复杂的陆内汇聚构造系统^[29,63]。研究表明,东亚侏罗纪陆内造山作用具有下列显著特征。(1)多向性:古老的纬向造山带,如阴山—燕山造山带、秦岭构造带、南岭构造带等,都不同程度地发生再生造山,在造山带两侧前陆地带形成新的前陆构造带,大巴山构造带便是典型的例子。经向构造带如鄂尔多斯西缘的南北构造带、NE-NNE 向新华夏系构造带,也在这个时期形成,这些不同方向的造山带在空间上发生联合,形成世界上特有的联合弧形构造型式。

(2)同时性:不同方向造山带的构造变形几乎同时在中晚侏罗世(165±5 Ma)启动,并经历了大致相同的幕式构造演化阶段^[29,64]。(3)弥散性:与经典的造山作用不同,侏罗纪陆内造山作用具有显著的弥散性变形特征,造山带宽度从几百千米至千余千米,如华南地区宽达 1300 km 的褶皱—逆冲构造带,就是在这个时期形成的^[65-66]。(4)前陆盆地不发育:除了鄂尔多斯西缘、四川盆地西缘和燕山南缘发育非典型的前陆磨拉石沉积外,大多数侏罗纪陆内造山带不发育前陆盆地。

由此可以确定,四川盆地周缘弧形褶皱构造带主体是东亚晚侏罗世陆内造山作用的产物,是陆内汇聚构造体系的组成部分。扬子地块的刚性特征使得褶皱构造带主要围绕其周边分布,出现环盆地发育的弧形褶皱构造带。这种分布样式与华北西部鄂尔多斯盆地周缘的侏罗纪变形特征类似^[67]。由于远离当时活动板块边界带,刚性块体周缘变形表现为薄皮性、弥散性等典型特征^[63]。

3.3 基底构造格架对盖层褶皱的控制作用

扬子地块基底的性质和组成非常复杂,构造活动的继承性表现明显^[68],其突出特点可以用“一盖多底”来概括^[69],即地块由多个不同性质的基底块体拼合而成,之间为断裂带所分割。如位于川东北地区的神农架隆起和黄陵背斜,这两个构造单元的结晶基底是不一样的。华蓥山断裂带两侧的盆地基底,通过磁异常反映的其组成和性质也不一样。这种基底拼合特点强烈影响了盖层褶皱样式的差异,使盖层褶皱出现条块分布特征。

另外,扬子地块在其漫长的地质演化历史中,经受了多次引张伸展作用^[70],基底发生不同程度的裂解,在基底中产生了引张破裂带。最重要的裂解作用发生在晚二叠世—早三叠世的峨眉地裂运动,这次裂解事件使得扬子地块周缘地带发生局部裂陷,控制了晚二叠—早三叠世的岩相带分布。川东北地区发现的大型气田正是受这个时期的伸展裂陷作用控制。在川—渝—黔—桂地区发育的隔槽式褶皱构造带中,近 N-S 向展布的长条状槽型向斜构造也可能受控于基底裂陷形成的破裂带。

4 初步结论

本文是在阅读前人资料的基础上,结合笔者自己的野外调查和构造测量,对四川盆地中生代构造

变形特征和重大构造事件进行了初步归纳,总结了中生代3次重大构造事件及其对盆地的形成和改造作用。中晚三叠世扬子克拉通地块与周邻地块(北部为华北地块、南部为印支地块)的碰撞造山与西缘增生作用导致了晚三叠世—早中侏罗世四川原形盆地(川—渝—黔—滇大型沉积盆地)的形成;中晚侏罗世发生的陆内造山作用形成了盆地周缘褶皱构造带,并对盆地原形进行了强烈改造;早晚白垩世之交的构造挤压事件进一步加强了盆地NNE向褶皱构造,又一次改造了四川盆地。

本文重点论述了围绕四川盆地北缘和东缘发育的弧形褶皱构造带的主体定型时代为中晚侏罗世。这些远离当时活动板块边界发育的大型弧形褶皱带完全不同于印支运动时期形成的碰撞造山带,它们具有前陆构造属性,其显著的特点表现为薄皮性和弥散性,是中国东部燕山运动时期陆内造山作用的产物,其产生的动力背景与东亚大陆周邻板块(东部为太平洋板块、北部为西伯利亚板块、西部为羌塘地块、南部为印支地块)多向汇聚作用密切相关,板块多向汇聚产生的远程效应引发了扬子克拉通周边造山带的再生复活,克拉通周缘形成弧形褶皱带,从而奠定了四川盆地的基本构造轮廓。晚侏罗世多向挤压构造作用对四川盆地的油气运移与富集至关重要。

参考文献(References):

- [1] Qiu Yumin, Gao Shan, McNaughton Neal J, et al. First evidence of >3.2 Ga continental crust in the Yangtze craton of south China and its implications for Archean crustal evolution and Phanerozoic tectonics[J]. *Geology*, 2000, 28:11-14.
- [2] Zheng Jianping, Griffin W L, Suzanne Y, et al. Widespread Archean basement beneath the Yangtze Craton [J]. *Geology*, 2006, 34:417-420.
- [3] Chen J F, Jahn B M. Crustal evolution of southeastern China: Nd and Sr isotopic evidence[J]. *Tectonophysics*, 1998, 284:101-133.
- [4] 陆松年, 李怀坤, 陈志宏, 等. 新元古时期中国古大陆与罗迪尼亚超大陆的关系[J]. *地学前缘*, 2004, 11(2):515-523.
Lu Songnian, Li Huaikun, Chen Zhihong, et al. Relationship between Neoproterozoic Cratons of China and the Rodina[J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, 11 (2):515-523 (in Chinese with English abstract).
- [5] Li X H, Li Z X, Ge W C, et al. Neoproterozoic granitoids in South China: Crustal melting above a mantle plume at ca.825Ma? [J] *Precambrian Research*, 2003, 122:45-83.
- [6] Li Z X, Li X H, Kinny P D, et al. Geochronology of Neoproterozoic syn-rift magmatism in the Yangtze Craton, South China and correlations with other continents: evidence for a mantle superplume that broke up Rodinia [J]. *Precambrian Research*, 2003, 122:85-109.
- [7] 李献华, 祁昌实, 刘颖, 等. 扬子块体西缘新元古代双峰式火山岩成因: Hf 同位素和 Fe/Mn 新制约 [J]. *科学通报*, 2005, 50(19): 2155-2160.
Li Xianhua, Qi Changshi, Liu Ying, et al. Petrogenesis of the Neoproterozoic bimodal volcanic rocks along the western margin of the Yangtze Block: new constraints from Hf isotopes and Fe/Mn ratios[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(21):2481-2486.
- [8] 耿元生, 杨崇辉, 王新社, 等. 扬子地台西缘结晶基底的时代[J]. *高校地质学报*, 2007, 13(3):429-441.
Geng Yuansheng, Yang Chonghui, Wang Xinshe, et al. Age of crystalline basement in western margin of Yangtze Terrane [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2007, 13 (3):429-441(in Chinese with English abstract).
- [9] 四川省地质矿产局. 四川省区域地质志[M]. 北京:地质出版社, 1991:159-260.
Bureau of Geology and Mineral Resources of Sichuan Province. *Regional Geology of Sichuan Province* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991:159-260(in Chinese with English abstract).
- [10] 罗志立, 金以钟, 朱夔玉, 等. 试论上扬子地台的峨眉地裂运动 [J]. *地质论评*, 1988, 34(1):11-24.
Luo Zhili, Jin Yizhong, Zhu Kuiyu, et al. On Emei taphrogenesis of the upper Yangtze platform[J]. *Geological Review*, 1988, 34(1): 11-24(in Chinese with English abstract).
- [11] 徐义刚. 地幔柱构造、大火成岩省及其地质效应 [J]. *地学前缘*, 2002, 9(4):341-352.
Xu Yigang. Mantle plumes, large igneous provinces and their geologic consequences[J]. *Earth Science Frontier*, 2002, 9(4):341-352(in Chinese with English abstract).
- [12] 刘宝珺, 许效松. 中国南方岩相古地理图集[M]. 北京:科学出版社, 1994:1-188.
Liu Baojun, Xu Xiaosong. *Atlas of Lithofacies Paleogeography in South China* [M]. Beijing: Science Press, 1994:1-188 (in Chinese with English abstract).
- [13] Wang H Z, Mo X X. An outline of the tectonic evolution of China [J]. *Episodes*, 1995, 18(1/2):6-16.
- [14] 王清晨, 蔡立国. 中国南方显生宙大地构造演化简史 [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(8):1025-1040.
Wang Qingchen, Cai Ligu. Phanerozoic tectonic evolution of south China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(8):1025-1040(in Chinese with English abstract).
- [15] Lin J L, Zhang W Y, Fuller M. Preliminary Phanerozoic polar wander path for the North and South China blocks [J]. *Nature*, 1985, 313:444-449.
- [16] Zhao X, Coe R S. Paleomagnetic constraints on the collision and rotation of North and South China [J]. *Nature*, 1987, 327:141-144.
- [17] Huang K N, Opdyke N D. Paleomagnetism of Jurassic rocks from

- southwestern Sichuan and the timing of the closure of the Qinling suture[J]. *Tectonophysics*, 1991, 200:299-316.
- [18] Yang Z Y, Courtillot V, Besse J, et al. Jurassic paleomagnetic constrains on the collision of the North and South China blocks[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1992, 19:577-580.
- [19] Enkin R J, Yang, Z Y, Chen Y, et al. Paleomagnetic constraints on the geodynamic history of the major blocks of China from Permian to the present[J]. *J. Geophys. Res.*, 1992, 97:13953-13989.
- [20] Gilder S, Courtillot V. Timing of the North-South China collision from new middle to late Mesozoic paleomagnetic data from the North China Block[J]. *J Geophyscl. Res.*, 1997, 102:17713-17727.
- [21] Yokoyama Masahiko, Liu Yuyan, Halim Nadir, et al. Paleomagnetic study of Upper Jurassic rocks from the Sichuan basin; tectonic aspects for the collision between the Yangtze Block and the North China Block[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 193, 273-285.
- [22] Meng Q R, Wang Erchie, Hu J M. Mesozoic sedimentary evolution of the northwest Sichuan Basin; Implication for continued clockwise rotation of the South China Block [J]. *GSA Bulletin*, 2005, 117(3/4):396-410.
- [23] Li S G, Xiao Y L, Liou D L, et al. Collision of the North China and Yangtze Blocks and formation of coesite-bearing eclogites; timing and processes[J]. *Chemical Geology*, 1993, 109(1-4):89-111.
- [24] Li S G, Li H M, Chen Y Z, et al. Chronology of ultrahigh pressure metamorphism of the Dabieshan-Sulu terrain-zircon U-Pb isotopic system [J]. *Science in China (Series D)*, 1997, 27 (3): 200-206.
- [25] Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L, et al. U/Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh-pressure Qinling - Dabie Orogen, China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, 161 (1-4): 215-230.
- [26] 许志琴, 索书田, 韩郁菁, 等. 中国松潘-甘孜造山带的造山过程 [M]. 北京:地质出版社, 1992:1-190.
Xu Zhiqin, Suo Shutian, Han Yuqing, et al. Orogenic Processes of the Songpan Ganze Orogenic Belt of China [M]. Beijing:Geological Publishing House, 1992:1-190(in Chinese with English abstract).
- [27] Andrew C, Delphine R, Charles B, et al. Understanding Mesozoic accretion in Southeast Asia: Significance of Triassic thermotectonism (Indosinian orogeny) in Viet Nam [J]. *Geology*, 2001, 29 (3):211-214.
- [28] 张渝昌. 中国含油气盆地原型分析[M]. 南京:南京大学出版社, 1997:5-97.
Zhang Yuchang. Archetypal analysis of petroliferous basins in China [M]. Nanjing:Nanjing University Press, 1997:5 -97 (in Chinese with English abstract).
- [29] Dong Shuwen, Zhang Yueqiao, Long Changxiang, et al. Jurassic Tectonic revolution in China and new interpretation of the Yanshan Movement[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(11):1449-1461.
- [30] 邓康龄. 四川盆地形成演化与油气勘探领域 [J]. *天然气工业*, 1992, 12(5):7-12.
Deng Kangling. Formation and evolution of Sichuan Basin and domains for oil and gas exploration [J]. *Natural Gas Industry*, 1992, 12(5):7-12(in Chinese with English abstract).
- [31] 童崇光. 四川盆地构造演化与油气聚集[M]. 北京:地质出版社, 1994:1-125.
Tong Chongguang. Structural Evolution and Hydrocarbon Accumulation of Sichuan Basin [M]. Beijing:Geological Publishing House, 1994:1-125(in Chinese with English abstract).
- [32] 郭正吾, 邓康龄, 韩永辉, 等. 四川盆地形成与演化[M]. 北京:地质出版社, 1996:200.
Guo Zhengwu, Deng Kangling, Han Yonghui, et al. The Formation and Development of Sichuan Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996:200 (in Chinese with English abstract).
- [33] 马永生. 中国南方构造-层序岩相古地理图集 (震旦纪-新近纪) [M]. 北京:科学出版社, 1994:301.
Ma Yongsheng. Atlas of Tectonic -Sequence Lithofacies Paleogeography in South China (Simian-Neogene) [M]. Beijing: Science Press, 1994:301(in Chinese with English abstract).
- [34] 吴根耀. 燕山运动和大陆晚中生代的活化 [J]. *地质科学*, 2002, 37(4):453-461.
Wu Genyao. The Yanshanian orogeny and late Mesozoic activation in China Continent [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2002, 37(4): 453-461(in Chinese with English abstract).
- [35] 乐光禹, 杜思清. 应力叠加和联合构造[J]. *中国科学(B 辑)*, 1986, 8:867-877.
Le Guangyu, Du Siqing. Stress superposition and combined tectonic [J]. *Science in China(Series B)* 1986, 8:867-877(in Chinese).
- [36] 张荣强, 周雁, 汪新伟, 等. 贵州西南部威-紫-罗断裂带构造特征及演化[J]. *地质力学学报*, 2009, 15(2):178-189.
Zhang Rongqiang, Zhou Yan, Wang Xinwei, et al. Structural features and tectonic evolution of the Wei-Zi-Luo fault zone in southwestern Guizhou Province[J]. *Journal of Geomechanics*, 2009, 15(2):178-189(in Chinese with English abstract).
- [37] 何建坤, 卢华复, 朱斌. 东秦岭造山带南缘北大山构造反转及动力学[J]. *地质科学*, 1999, 34(2):139-153.
He Jiankun, Lu Huaifu, Zhu Bin. The tectonic inversion and its geodynamic processes in northern Daba mountains of eastern Qinling orogenic belt [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1999, 34(2): 139-153(in Chinese with English abstract).
- [38] 张岳桥, 施炜, 李建华, 等. 大巴山前陆弧型构造带形成机理分析[J]. *地质学报*, 2011(待刊).
Zhang Yueqiao, Shi Wei, Li Jianhua, et al. Formation mechanism of the foreland arc-shaped Dabashan structural belt [J]. *Acta Geologica Sinica*, in press.
- [39] Yan Danping, Zhang Bing, Zhou meifu, et al. 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 [J]. *Journal of Structural*

- Geology, 2009, 31, 150–162.
- [40] 蔡立国, 刘和甫. 四川前陆褶皱-冲断带构造样式与特征 [J]. 石油实验地质, 1997, 19(2):115–120.
Cai Ligu, Liu Hefu. Structural styles and characteristics of fold-thrust belts in Sichuan foreland Basin [J]. Experimental Petroleum Geology, 1997, 19(2):115–120(in Chinese with English abstract).
- [41] 颜丹平, 汪新文. 川鄂湘边区褶皱构造样式及其成因机制分析 [J]. 现代地质, 2000, 14 (1):37–43.
Yan Danping, Wang Xinwen. Analysis of fold style and its formation mechanism in the area of boundary among Sichuan, Hubei and Hunan [J]. Geoscience, 2000.14 (1):37–43(in Chinese with English abstract).
- [42] Yan D P, Zhou M F, Song H L, et al. Origin and tectonic significance of a Mesozoic multi-layer over-thrust system within the Yangtze Block (South China) [J]. Tectonophysics, 2003, 361: 239–254.
- [43] 丁道桂, 郭彤楼, 胡明霞, 等. 论江南-雪峰基底拆离式构造 [J]. 石油实验地质, 2007, 29(2):120–132.
Ding Daogui, Guo Tonglou, Hu Mingxia, Liu Yunli. Basement decoupling structure in Jiangnan-Xuefeng-Series 1 of the southern structure studies [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2007, 29 (2):120–132(in Chinese with English abstract).
- [44] 丁道桂, 刘光祥. 扬子板内递进变形——南方构造问题之二 [J]. 石油实验地质, 2007, 29(3):238–252.
Ding Daogui, Liu Guangxiang. Progressive Deformation in Yangtze Plate-series 2 of the southern structure studies [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2007, 29 (3):238–252 (in Chinese with English abstract).
- [45] 秦起荣, 苏培东, 李乐, 等. 川中低缓构造成因 [J]. 新疆石油地质, 2005, 26(1):108–111.
Qin Qirong, Su Peidong, Li Le, et al. Origin of low structures in central Sichuan basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2005, 26(1): 108–111(in Chinese with English abstract).
- [46] Meng Qingren, Hu Jianmin, Wang Erqi, et al. 2006. Late Cenozoic denudation by large magnitude landslides in the eastern edge of Tibetan Plateau [J]. Earth and Planetary Science Letters, 243:252–267.
- [47] 贾东, 陈竹新, 贾承造, 等. 龙门山褶皱冲断带构造解析与川西前陆盆地的发育 [J]. 高校地质学报, 2003, 9(3):402–410.
Jia Dong, Chen Zhuxin, Jia Chengzao, et al. Structural features of the Longmenshan fold and thrust belt and development of the western Sichuan foreland basin, central China [J]. Geological Journal of China Universities, 2003, 9(3):402–410(in Chinese with English abstract).
- [48] 陈竹新, 贾东, 张榘, 等. 龙门山前陆褶皱冲断带的平衡剖面分析 [J]. 地质学报, 2005, 79(1): 38–45.
Chen Zhuxin, Jia Dong, Zhang Qie, et al. Balanced cross-section analysis of the fold-thrust belt of Longmen Mountains [J]. Acta Geologica Sinica, 2005, 79 (1):38–45 (in Chinese with English abstract).
- [49] Burchfiel B C, Chen Z, Liu Y, et al. Tectonics of the Longmen Shan and adjacent regions, central China [J]. International Geological Review, 1995, 37(8), 661–735.
- [50] 刘树根, 赵锡奎, 罗志立, 等. 龙门山造山带-川西前陆盆地系统构造事件研究 [J]. 成都理工学院学报, 2001, 28(3):221–230.
Liu Shugen, Zhao Xikui, Luo Zhili, et al. Study on the tectonic events in the system of the Longmen mountain-west Sichuan foreland basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2001, 28 (3): 221–230 (in Chinese with English abstract).
- [51] 王二七, 尹纪云. 川西南新生代构造作用以及四川原型盆地的破坏 [J]. 西北大学学报(自然科学版), 2009, 39(3):359–367.
Wang Erqi, Yin Jiyun. Cenozoic multi-stage deformation occurred in southwest Sichuan: Cause for the dismemberment of the proto-Sichuan Basin [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2009, 39(3):359–367(in Chinese with English abstract).
- [52] 刘树文, 王宗起, 阎全人, 等. 折多山花岗岩时代、成因及其动力学意义 [J]. 岩石学报, 2006, 22(2):343–352.
Liu Shuwen, Wang Zongqi, Yan Quanren, et al. Timing, petrogenesis and geodynamic significance of Zheduoshan Granitoids [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(2):343–352(in Chinese with English abstract).
- [53] 刘树根, 李智武, 刘顺, 等. 大巴山前陆盆地-冲断带的形成演化 [M]. 北京:地质出版社, 2006:1–248.
Liu Shugen, Li Zhiwu, Liu Shun, et al. Formation and Evolution of Dabashan Foreland Basin and Fold-and-thrust Belt, Sichuan, China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006:1–248 (in Chinese with English abstract).
- [54] 董树文, 胡健民, 李三忠, 等. 大别山侏罗纪变形及其构造意义 [J]. 岩石学报, 2005, 21(4):1189–1194.
Dong Shuwen, Hu Jianmin, Li Sanzhong, et al. The Jurassic deformation in the Dabie Mountains and its tectonic significances [J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21 (4):1189–1194 (in Chinese with English abstract).
- [55] 董树文, 胡健民, 施炜, 等. 大巴山侏罗纪叠加褶皱与侏罗纪前陆 [J]. 地球学报, 2006, 27(5):403–410.
Dong Shuwen, Hu Jianmin, Shi Wei, et al. Jurassic superposed folding and Jurassic foreland in the Daba Mountain, central China [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2006, 27 (5):403–410 (in Chinese with English abstract).
- [56] Xu Huaming, Liu Shu, Qu Guosheng, et al. Structural characteristics and formation mechanism in the Micangshan foreland, South China [J]. Acta geologica Sinica (English Edition), 2009, 83(1): 81–91.
- [57] 许志琴, 卢一伦, 汤耀庆, 等. 东秦岭造山带的变形特征与构造演化 [J]. 地质学报, 1986, 3: 237–247.
Xu Zhiqin, Lu Yilun, Tang Yiaoping, et al. Deformation characteristics and tectonic evolution of eastern Qingling orogenic belt [J]. Acta Geologica Sinica, 1986, 3:237–247 (in Chinese with English abstract).

- [58] 沈传波, 梅廉夫, 徐振平, 等. 大巴山中-新生代隆升的裂变径迹证据[J]. 岩石学报, 2007, 23(11):2901-2910.
Shen Chuanbo, Mei Lianfu, Xu Zhenping, et al. Fission track thermochronology evidence for Mesozoic-Cenozoic uplifting of Daba Mountain, central China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(11): 2901-2910(in Chinese with English abstract).
- [59] 胡召齐, 朱光, 刘国生, 等. 川东“侏罗山式”褶皱带形成时代: 不整合面的证据[J]. 地质论评, 2009, 55(1):731-742.
Hu Shaoqi, Zhu Guang, Liu Guosheng, et al. The folding time of the eastern Sichuan Jura-type fold belt: evidence from unconformity [J]. Geological Review, 2009, 55(1):731-742 (in Chinese with English abstract).
- [60] 胡健民, 施炜, 渠洪杰, 等. 秦岭造山带大巴山弧型构造带中生代构造变形[J]. 地学前缘, 2009, 16(3):49-68.
Hu Jianmin, Shi Wei, Qu Hongjie, et al. Mesozoic deformation of Dabashan curvilinear structural belt of Qinling orogen [J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(3):49-68 (in Chinese with English abstract).
- [61] 张岳桥, 赵越, 董树文, 等. 中国东部及邻区早白垩世裂陷盆地构造演化阶段[J]. 地学前缘, 2004, 11(3):123-133.
Zhang Yueqiao, Zhao Yue, Dong Shuwen, et al. Tectonic evolution stages of the Early Cretaceous rift basins in eastern China and adjacent areas and their geodynamic background [J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(3):123-133(in Chinese with English abstract).
- [62] 刘树根, 徐国盛, 李巨初, 等. 龙门山造山带-川西前陆盆地系统的成山成盆成藏动力学 [J]. 成都理工大学学报 (自然科学版), 2003, 30(6):559-566.
Liu Shugen, Xu Guosheng, Li Juchu, et al. 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 [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2003, 30(6):559-566(in Chinese with English abstract).
- [63] 董树文, 张岳桥, 陈宣华, 等. 晚侏罗世东亚多向汇聚构造体系的形成与变形特征[J]. 地球学报, 2008, 29(3):306-317.
Dong Shuwen, Zhang Yueqiao, Chen Xuanhua, et al. The formation and deformational characteristics of east Asia multi-direction convergent tectonic system in Late Jurassic [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2008, 29(3): 306-317(in Chinese with English abstract).
- [64] Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, Zhao Yue, et al. Jurassic tectonics of North China: a synthetic view[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2008, 82(2):310-326.
- [65] 张岳桥, 徐先兵, 贾东, 等. 华南早中生代从印支期碰撞构造体系向燕山期俯冲构造体系转换的形变记录 [J]. 地学前缘, 2009, 16(1):234-247.
Zhang Yueqiao, Xu Xianbing, Jia Dong, et al. Deformation record of the change from Indosinian collision-related tectonic system to Yanshanian subduction-related tectonic system in South China during the Early Mesozoic[J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(1): 234-247(in Chinese with English abstract).
- [66] 徐先兵, 张岳桥, 贾东, 等. 华南早中生代大地构造过程[J]. 中国地质, 2009, 36(3):573-593.
Xu Xianbing, Zhang Yueqiao, Jia Dong, et al. Early Mesozoic geotectonic processes in South China [J]. Geology in China, 2009, 36(3):573-593(in Chinese with English abstract).
- [67] 张岳桥, 董树文, 赵越, 等. 华北侏罗纪大地构造: 综评与新认识 [J]. 地质学报, 2007, 81(11):1462-1480.
Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, Zhao Yue, et al. Jurassic tectonics of North China: a synthetic view [J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(11):1462-1480(in Chinese with English abstract).
- [68] 吴根耀, 梁兴, 马力. 扬子克拉通继承性构造与新生构造并存的时空发育特征及其对海相油气勘探的指导 [J]. 石油实验地质, 2009, 31(1):1-11.
Wu Genyao, Liang Xing, Ma Li. Time-spatial developing features of co-existed inherited and neogenic structures and their guidance to marine origin oil-gas exploration in the Yangtze craton [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2009, 31(1):1-11 (in Chinese with English abstract).
- [69] 常印佛, 董树文, 黄德志. 论中一下扬子“一盖多底”格局与演化 [J]. 火山地质与矿产, 1996, 17(1/2): 1-22.
Chang Yinbo, Dong Shuwen, Huang Dezhi. On tectonics of “poly-basement with one cover” in Middle-Lower Yangtze Craton China [J]. Volcanology & Mineral Resources, 1996, 17(1/2):1-22(in Chinese with English abstract).
- [70] 罗志立. 中国西南地区晚古生代以来地裂运动对石油等矿产的影响 [J]. 四川地质学报, 1981, 2(1):1-22.
Luo Zhili. Effect of taphrogenesis on the oil and other mineral Since late Paleozoic in the southwest China [J]. Acta Geologica Sichuan, 1981, 2(1):1-22(in Chinese).

Mesozoic multi-directional compressional tectonics and formation-reformation of Sichuan basin

ZHANG Yue-qiao^{1,2}, DONG Shu-wen³, LI Jian-hua³, SHI Wei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Neotectonic Movement and Geohazard, Ministry of Land and Resources, Beijing 100081, China; 2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China; 3. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: The Sichuan basin located far away from the active plate boundaries is well known for its surrounding fold zones whose genesis and tectonic settings have long been one of the key issues in the geotectonic study of South China. Based on a compilation of regional structural geology and an analysis of superimposed folding structures, this paper presents a synthetic discussion on the Mesozoic compressional tectonics in such aspects as its deformation features and structural styles, main tectonic events and their timing. Studies show that the Sichuan basin and its surrounding zones experienced three major tectonic events during Mesozoic, each one creating fold zones that were compounded spatially and resulted in the formation and reformation of the Sichuan basin. The Triassic collisional orogeny along the northern and western margins of the Yangtze cratonic block resulted in the formation of the proto basin, i.e., the Chuan-Yu-Dian-Qian sedimentary basin whose extending size is larger than the present-day Sichuan basin. Folds created by this tectonic event mainly trend in W-E direction. Tectonic regime changed profoundly during the Middle-Late Jurassic, dominated by multi-directional plate convergences in Asia, which caused rejuvenation of old orogenic belts and formation of new tectonic systems. In particular, the rejuvenation of the Qinling orogenic belt resulted in the development of the Micangshan-Dabashan foreland fold and fault zone along the northern margin of the Sichuan basin; the westward subduction of the Paleo-Pacific plate activated the Xuefengshan tectonic zone and created the oroclinal folds in east and south Sichuan; the eastward extrusion of the Songpan-Ganze orogenic belt reactivated the Longmenshan-Jinpingshan thrust zone in west Sichuan. This multi-directional compressional event greatly reformed the proto Sichuan basin, and shaped the basic structural pattern surrounding the Sichuan basin. The third major event occurred in latest Cretaceous and was characterized by NW-SE compression, and it strengthened the NE-SW trending structures. It is concluded that the main fold zones in and around the Sichuan basin was characterized by pervasively distributed thin-skinned structures mainly formed in Middle-Late Jurassic, and in consequence of multi-directional intracontinental orogeny, they constituted in turn part of the convergent tectonic system in east Asia.

Key words: Sichuan basin; Mesozoic; thin skinned structure; multi-directional compression; basin reformation

About the first author: ZHANG Yue-qiao, male, born in 1963, professor and supervisor of doctor candidates, mainly engages in the study of structural geology, tectonics, neotectonics and basin analysis; E-mail: yueqiao-zhang@sohu.com.