

Large Lithologic Gas Provinces
Exploration of Xujiahe Formation in Sichuan Basin

四川盆地须家河组 岩性大气区勘探

杜金虎 徐春春 等著



石油工业出版社

四川盆地须家河组 岩性大气区勘探

杜金虎 徐春春 魏国齐 邹才能 等著
杨 威 沈 平 何海清 谢继容

石油工业出版社

内 容 提 要

本专著是对近几年四川盆地须家河组地质和工程技术攻关成果的系统总结,创新地提出了岩性大气区的地质理论认识、“三个整体”的勘探思路、“五个步骤”的勘探程序以及“一体化”的勘探方法,并且配套形成了岩性大气区勘探的四项关键技术。

可供石油地质勘探和天然气地质综合研究的专业人员以及大专院校相关专业的师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

四川盆地须家河组岩性大气区勘探/杜金虎等著.
北京:石油工业出版社,2011. 10
ISBN 978-7-5021-8764-4
I. 四…
II. 杜…
III. 四川盆地-须家河组-岩性油气藏-油气勘探-研究
IV. P618.130.2
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 217528 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:<http://www.petropub.com.cn>

编辑部:(010)64523543 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:北京市前进印刷厂

2011 年 10 月第 1 版 2011 年 10 月第 1 次印刷

787 毫米×1092 毫米 开本:1/16 印张:11.75

字数:300 千字

定价:80.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

序

上三叠统须家河组作为四川盆地天然气主要勘探层系之一,勘探工作始于20世纪50年代,但由于地质认识程度较低,长期以来,勘探仅以局部构造勘探和兼探为主,因此,一直未取得重大勘探突破。2005年,川中地区广安2井获高产气流,拉开了须家河组岩性气藏勘探的序幕。

为了进一步整体认识四川盆地须家河组天然气成藏条件和分布富集规律,有效指导大川中地区须家河组勘探工作,中国石油勘探与生产分公司统一组织西南油气田分公司、中国石油勘探开发研究院等多家单位,系统地开展了四川盆地须家河组天然气地质综合评价和配套技术联合攻关。通过六年的勘探实践—认识一再实践一再认识,地质理论和勘探技术取得以下重大进展。

创新提出了岩性大气区的地质理论认识,认为大川中地区须家河组是大型平缓斜坡背景上,由相似成藏条件控制、以岩性气藏为主的多个气藏(田)群组成,纵向上相互叠加、横向上复合连片的大型含气区。稳定克拉通基底上的小冲断大斜坡背景、广覆式源储一体的生储盖组合和面积多层段低孔低渗储层三大要素的良好匹配控制岩性大气区形成与分布,优质储层和裂缝发育控制了天然气的富集高产。

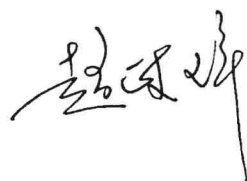
创新提出了岩性大气区勘探思路和方法:整体研究、整体部署、整体勘探的三个整体勘探思路;识别评价、风险勘探(包括重点预探)、整体部署、技术攻关、整体控制的五个步骤勘探程序;勘探开发一体化的勘探方法。

配套形成了岩性大气区勘探的四项关键技术:有效储层地震预测及烃类检测技术、低渗储层测井评价技术、气层保护钻井技术和提高单井产量技术。

地质理论和技术创新有效推动了四川盆地须家河组天然气勘探快速发展。“十一五”以来,须家河组先后发现了广安、合川等多个千亿立方米大气田,万亿立方米大气区初具规模。

《四川盆地须家河组岩性大气区勘探》这本专著正是对近几年四川盆地须家河组地质和工程技术攻关成果的系统总结,也是针对四川盆地须家河组岩性大气区勘探的第一部理论专著,更是一部岩性大气区勘探理论实践、技术方法的系统集成。大气区勘探理论丰富和发展了复式油气聚集带的勘探理论,推动了油气勘探由局部圈闭向大区的发展。勘探技术方法具有很强的针对性和指导性,保障了大气区勘探的科学、快速、有效推动。

本专著源于实践,指导生产,是一部勘探理论和勘探实践高度融合的重要论著,具有较高的学术价值,同时对其他类似探区的勘探工作也具有一定的借鉴意义。



目 录

绪论	(1)
第一章 盆地结构性质与演化	(6)
第一节 盆地性质与基底特征	(6)
第二节 上三叠统盆地构造单元特征	(9)
第三节 晚三叠世以来盆地构造演化	(13)
第二章 大面积多物源三角洲沉积体系	(18)
第一节 地层划分和展布	(18)
第二节 物源及相标志	(32)
第三节 沉积相特征	(44)
第三章 大面积多层段烃源岩特征及资源潜力	(66)
第一节 烃源岩有机质丰度	(66)
第二节 烃源岩有机质形成环境和类型	(71)
第三节 烃源岩成熟度	(78)
第四节 天然气资源潜力	(81)
第四章 大面积多层段低渗砂岩储层特征与展布	(94)
第一节 储层基本特征	(94)
第二节 储层发育控制因素	(109)
第三节 储层展布	(114)
第五章 天然气分布及富集规律	(124)
第一节 气藏类型与特征	(124)
第二节 天然气分布规律	(133)
第六章 须家河组岩性大气区勘探方法和配套技术	(144)
第一节 勘探思路和方法	(144)
第二节 有效储层地震预测及烃类检测技术	(148)
第三节 低渗储层测井评价技术	(156)
第四节 气层保护钻井技术	(161)
第五节 提高单井产量技术	(163)
第七章 须家河组勘探潜力与区带评价	(170)
第一节 勘探潜力	(170)
第二节 区带评价	(171)
参考文献	(179)

绪 论

四川盆地面积约 $18 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。盆地周缘为山脉,西为龙门山、北为米仓山和大巴山、南为大凉山和娄山、东为七曜山;盆地内部地势起伏较大,海拔 $300 \sim 500 \text{ m}$ 。作为大型叠合含油气盆地之一,盆地演化经历了震旦纪—中三叠世的克拉通盆地和晚三叠世—新生代前陆盆地两大阶段。地层发育齐全,震旦系—中三叠统为海相地层,以碳酸盐岩为主,厚度 $6000 \sim 7000 \text{ m}$;上三叠统一白垩系主要为陆相地层,厚度 $2000 \sim 5000 \text{ m}$ 。盆地发育多套生储盖组合和多套含油气系统,须家河组为其中一套重要的生储盖组合和含油气系统。盆地勘探工作始于 20 世纪 50 年代,经过几十年的勘探开发,截至 2010 年底,全盆地累计探明天然气地质储量 $2.2 \times 10^{12} \text{ m}^3$,探明石油地质储量 $8240.6 \times 10^4 \text{ t}$,已经成为我国西南地区重要的天然气工业基地。

一、勘探历程

四川盆地须家河组天然气勘探始于 20 世纪 50 年代,长期以来,一直以构造气藏勘探和兼探为主,天然气探明地质储量仅 $318 \times 10^8 \text{ m}^3$,始终未取得实质性的突破。2005 年以后,以“大油气区”地质勘探理论为指导,加强地质综合研究和新技术、新工艺攻关,大川中地区天然气勘探取得重大突破,发现广安、合川、安岳等多个以岩性气藏为主的千亿立方米大气田。截至 2010 年底,中国石油在须家河组共探明天然气地质储量近 $6000 \times 10^8 \text{ m}^3$,三级储量近万亿立方米。其勘探历程大体可分为以下几个阶段:

1. 中小型构造气藏勘探和兼探阶段(2005 年以前)

该阶段勘探工作主要集中在川中和川西地区,以局部构造勘探和深层勘探的兼探为主,先后发现了中坝、平落坝、白马庙、邛西、遂南等中小型构造气田,探明天然气地质储量仅 $318 \times 10^8 \text{ m}^3$,勘探一直未取得重大突破。该阶段的勘探实践初步证明,须家河组是四川盆地重要的勘探层系之一。

2. 大面积岩性气藏发现阶段(2005—2006 年)

2005 年,川中地区广安构造的广安 2 井在须六段获日产天然气 $4.2 \times 10^4 \text{ m}^3$,展示了须家河组良好的岩性气藏勘探潜力,笔者在认真总结以往勘探实践和地质认识的基础上,指出大川中地区具备形成岩性大气区的地质条件,在勘探思路上实现了从构造圈闭到岩性圈闭、从单个构造到大面积含气、从川西地区到大川中地区的重大转变。以岩性大气区勘探理论为指导,在整体控制、整体探明广安气田的同时,大胆甩开部署了一组风险探井如鲜渡 1、合川 1、安岳 2 和安岳 3 等,其中合川 1、鲜渡 1 和安岳 2 获工业气流,开启了四川盆地须家河组天然气勘探大发展的新篇章。

3. 整体部署、规模增储阶段(2007 年至今)

在须家河组天然气勘探获得重大突破之后,在“大川中大气区”认识的指导下,采取“整体研究、整体部署、整体勘探”的勘探思路及方法,将大川中地区整体部署的 $8 \text{ km} \times 8 \text{ km}$ 二维地震测网加密到 $4 \text{ km} \times 4 \text{ km}$,重点区块地震测网加密到 $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$,整体评价大川中地区须

二、四、六段,开展基础地质、地震处理解释、储层预测等方面的研究工作,加强技术攻关,采用先进适用的欠平衡钻井、加砂压裂改造等技术,先后探明了以须二、四、六段为主要产气层的广安、合川、安岳、潼南等多个千亿立方米大气田,发现了营山、龙岗、蓬莱等千亿立方米含气区。在剑阁、九龙山、莲花山、灌口、安岳等地区须一、三、五段获得重要发现,川西北部剑阁地区须三段多口井获得高产工业气流,剑门 102 井须三段获日产天然气 $102 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的高产。整体部署、整体勘探成效显著,近几年来,大川中地区须家河组年增天然气三级地质储量超 $3000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 以上,成为四川盆地天然气规模增储,规模建产的重要领域之一。

二、地质研究新认识

为了进一步指导四川盆地须家河组天然气勘探,近几年,以资源潜力研究为基础,以沉积和砂体研究为重点,以储层展布研究为主线,深入开展盆地构造特征、烃源岩分布、沉积体系与砂体展布、储层主控因素、天然气富集规律和勘探配套技术等方面的研究工作,在不断学习—认识—再学习—再认识的基础上,取得了一系列创新性成果及认识:

1. 稳定克拉通基底,小冲断、大斜坡背景,频繁上下振荡,形成广覆式生储盖组合

晚三叠世须家河期盆地是在扬子地台西缘被动大陆边缘的基础上形成的前陆盆地,沉积基底是扬子地台西缘中三叠统及其以下的沉积岩层,为稳定统一的克拉通基底。盆地西缘龙门山前构造活动强烈,发育冲断带。由冲断带前缘到前陆斜坡的广大地区,构造平缓(地层倾角一般 $1^\circ \sim 2^\circ$),变形较弱,分布面积达 $7.9 \times 10^4 \text{ km}^2$,约占整个四川盆地面积的一半。整体来看,具有小冲断、大斜坡的构造特征。须家河组沉积时期构造活动以垂直升降运动为主,频繁的湖侵与湖退,形成了广覆式烃源岩与大面积砂体的互层发育,生储盖组合广覆式展布,为须家河组大面积成藏奠定了基础。

2. 大面积多层段烃源岩广覆式分布,有机质丰度高,成熟度适中,资源潜力大

湖盆沉积受湖平面频繁升降的控制,须家河组 6 段均发育烃源岩,其中须一、三、五段是主力烃源岩层。烃源岩有机质丰度高,须一段有机碳含量 $> 1\%$ 的占 54% ,须三段有机碳含量 $> 1\%$ 的占 82% ,须五段有机碳含量 $> 1\%$ 的占 78% 。厚度大,分布范围广,三套烃源岩叠加厚度最大 800 m ,厚度大于 50 m 的分布面积约 $16.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。须二、四、六段为次要烃源岩层,烃源岩叠加厚度最大 500 m ,厚度大于 50 m 的分布面积约 $6 \times 10^4 \text{ km}^2$,但烃源岩丰度较高,平均有机碳含量 $0.61\% \sim 3.06\%$ 。烃源岩整体处于成熟阶段,呈现广覆式生烃的特征。生气强度大,大部分地区在 $(10 \sim 50) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$,大于 $10 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 的面积约 $10.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。天然气运聚系数较高,分布在 $2.0\% \sim 5.2\%$ 之间,预测天然气总资源量约 $6.1 \times 10^{12} \text{ m}^3$,目前资源探明率仅 10% ,丰富的资源为大气区的形成奠定了重要的气源基础。

3. 多物源敞流型浅水三角洲湖盆体系,多层段砂体叠合连片,满盆富砂

综合分析地震、测井、单井和露头资料,将须家河组划分为 4 个三级层序,12 个体系域。层序 I 对应于须一段,层序 II 对应于须二段和须三段,层序 III 对应于须四段和须五段,层序 IV 对应于须六段。须一、三、五段以泥质沉积为主,须二、四、六段以砂质沉积为主。晚三叠世,盆地西南部发育出水口与西昌盆地相连,造成“敞流型”大型三角洲沉积体系发育,深湖沉积分布局限。盆地周边发育 4 大物源区,从而形成 4~6 个大型三角洲砂体。多物源、小坡降、浅水体的频繁进退,造成盆内大型三角洲砂体多期叠置,砂体大面积分布。须二、四、

六段砂岩百分比高达 70% 以上,叠合分布面积达 $(12 \sim 17) \times 10^4 \text{ km}^2$,满盆富砂;须一、三、五段也有规模不等的砂体发育,砂岩百分比达 30% 以上,叠合分布面积达 $(4 \sim 6) \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

4. 低孔渗储层发育,多层段叠加大面积复合连片,沉积微相、成岩相和裂缝控制有效储层分布

须家河组储集层段以须二、四、六段为主,须一、三、五段次之,储层孔隙主要是残余原生粒间孔和次生溶蚀孔,孔隙度一般为 5% ~ 10%,渗透率一般为 0.01 ~ 1mD,总体属低孔低渗和特低孔特低渗储层。储层发育主要受沉积微相、成岩相和裂缝控制,沉积微相是有效储层发育的基础,频繁迁移的水下分流河道是有利的沉积微相;溶蚀作用和绿泥石衬边是有利的成岩作用,也是有利储层形成的关键;裂缝是改善低孔低渗储层渗透性的重要因素。综合评价认为,须二、四、六段有效储层大面积分布,形成纵向上多套储层互相叠置,大面积分布。须二段有利储层分布面积约 $8 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、须四段约 $9.6 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、须六段约 $9.5 \times 10^4 \text{ km}^2$;须三、须五段局部也发育有效储层,各层段储层的有利储层叠合面积达 $14 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

5. 源储一体、面状供烃、近源高效聚集,大面积成藏,以岩性气藏为主

须家河组纵向上具有烃源岩和储集体大规模间互叠置发育特征,如川中地区须三段成熟烃源岩厚度大于 20m 的面积为 $5.3 \times 10^4 \text{ km}^2$,占川中地区面积的 70% 以上,与砂岩接触面积占整个烃源岩分布面积的 80% 以上。这种源储一体大面积紧密接触的分布关系,使得成熟烃源岩具有面状供烃、近源高效聚集的成藏特征。须家河组频繁升降造成的多个层序界面,与后期的构造活动形成的微断裂、裂缝共同构成天然气运聚网络,为大面积成藏提供了良好的运移通道。近源高效聚集是川中岩性大气区形成的重要条件之一。

6. 三大地质因素控制了须家河组岩性大气区的形成、分布与富集

稳定克拉通基底上的小冲断大斜坡构造背景、广覆式生储盖组合和面积多层段低孔渗非均质储层三大要素的良好匹配控制了大川中须家河组岩性大气区的形成与分布。平缓的前陆斜坡背景和广泛分布的低孔渗砂岩储层为川中地区大面积岩性气藏的形成提供了基础;源储一体广覆式展布,面状—网状供烃控制了天然气的大面积分布;优质储层和裂缝发育控制了天然气的富集高产。

三、勘探技术进展

针对须家河组砂岩厚度大、有效储层相对较薄、气藏丰度较低、气水关系复杂的特点,近几年,加强地震、测井、钻井和气层改造等关键技术攻关,通过在实践中不断探索,形成了一套适用于须家河组大面积岩性气藏勘探的配套技术,有效地提高了勘探成功率和单井产量,指导了年度勘探部署、目标评价,促进了勘探工作的顺利进行。

1. 有效储层地震预测及烃类检测技术

须家河组勘探面积大,在大川中地区有利勘探面积约 $5 \times 10^4 \text{ km}^2$,针对砂岩储层薄互层低孔渗的特点,在叠前高保真地震资料处理和地震相分析明确砂体展布的基础上,通过岩石物理参数分析,确定出岩性阻抗、 $\mu\rho$ 等储层敏感参数,结合弹性参数反演、地震衰减气藏检测等技术,有效预测含气储层分布,预测符合率达 85%。

2. 低渗储层测井评价技术

针对储层横向变化大,非均质性强,气层低孔低渗,高束缚水饱和度的特点,以岩心和测

试资料分析为基础,采取边研究、边完善、边模块化程序编制、边推广的模式,优选出自然伽马、声波时差、电阻率等对岩性敏感的参数变量,采用模糊聚类分析方法识别出有效储集层,结合可动水分析法、深侧向和深感应电阻率组合法以及纵横波速度比法,进行气水层综合识别,有效地发挥了测井精细解释评价的作用,测井解释符合率从 53.7% 提高到 80%。

3. 气层保护钻井技术

针对须家河组低孔低渗储层,易发生水锁、水敏、酸敏等不可逆的损害的特性,积极探索,形成了适用于低孔低渗气藏的欠平衡配套钻井技术,在勘探开发中,不仅有效地保护了气层(气层发现率达 76.6%)、大幅度提高了单井产量,而且提高了钻速(较平衡钻井提速 52%~109%),缩短了钻井周期,降低了工程成本,极大地推动了须家河组大气区的勘探和开发工作。

4. 提高单井产量技术

针对须家河组岩性气层储层低孔低渗、非均质性强、裂缝发育不均、纵向上薄互层的特点,在单层加砂压裂技术工艺的基础上,开发并引进分层工具、连续油管喷射工具、水平井裸眼分段封隔器等先进的工艺设备,形成了机械封隔器分层压裂技术、连续油管喷砂射孔环空分层压裂技术、水平井分段加砂压裂等技术系列。加砂压裂技术的攻关应用,使单井产能由初期压裂改造后的日产 1 至几万立方米增加到日产几万至几十万立方米,甚至超过百万立方米,实现了须家河组低渗气藏开发的规模效益。

四、勘探思路及方法

通过几年的勘探实践,在须家河组大面积岩性气藏发育的地质新认识基础上,突破构造圈闭概念,确定了适用于低孔渗砂岩气藏的“三个整体、五个步骤、一个一体化”的勘探思路和方法。

1. “三个整体”的勘探思路

整体研究、整体部署、整体勘探是大气区快速发现、科学高效勘探的重要前提。整体研究的目的是明确大气区成藏条件、主控因素,建立成藏模式,确定大气区分布范围,评价天然气资源潜力,把握天然气分布规律,落实有利勘探目标,为科学探索与勘探部署提供地质依据。整体部署是按照大气区研究成果,整体规划部署地震、钻井、技术攻关、地质研究工作及储量上交顺序。整体勘探是按照快速、经济、有效的原则,预探、评价勘探分清层次,多目的层整体勘探,实现整体控制,有序探明,整体推进大气区的发展。

2. “五个步骤”的勘探程序

大气区的勘探程序可概括为“识别评价、风险勘探(包括重点预探)、整体部署、技术攻关、整体控制”五大程序。2005 年广安 2 井获得工业气流之后,至 2010 年已经形成万亿立方米大气区,其勘探过程概括为以下几点:一是大气区的识别评价,2006 年地质研究提出了川中地区为大气区的成藏新认识,评价确定了大气区的有利勘探范围;二是风险勘探,按照“井组”勘探的思路一次部署风险探井 6 口,4 口获工业气流,控制面积 $1.5 \times 10^4 \text{ km}^2$;三是整体部署,以川中岩性大气区整体评价的研究成果为依据,对川中地区进行整体部署,5 年共部署二维地震 $2.6 \times 10^4 \text{ km}$,三维地震 1172 km^2 ,部署探井 168 口;四是技术攻关,积极开展地震储层预测与气层改造等工程技术攻关,攻克技术瓶颈,努力提高了储集层预测精度,大幅

提高单井产量;五是整体控制,突出重点,预探、评价勘探分清层次,多目的层整体勘探,实现整体控制,有序探明。科学的程序保障了勘探工作的快速高效。

3. “一体化”的勘探方法

由于川中地区须家河组大面积低渗砂岩气藏地质条件极为复杂,储量规模大,储层低孔、低渗、低产、低丰度,要达到整体探明需要很长的勘探周期以及投入巨大的工作量。为了提高勘探开发的整体效益,在不断认识、不断探索的勘探过程中,逐步形成了勘探开发一体化的大气区的评价方法。勘探开发部署上紧密结合、资料共享,深化地质认识,及时调整部署,减少探井工作量,加快了勘探节奏,提高了勘探成效。

五、勘探成效与潜力

持续的地质研究认识创新和工程技术攻关,有效地指导了四川盆地须家河组天然气勘探,取得了可喜的成果。“十一五”期间,以大气区勘探理论为指导,在风险井组获得突破之后,通过不断研究、不断攻关、不断探索,先后探明了以须二、四、六段为主要产气层的广安、合川、潼南、安岳等千亿立方米大气田,发现了营山、龙岗、蓬莱等千亿立方米含气区。2005年至2010年底,四川盆地须家河组累计探明天然气地质储量 $5280 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、三级地质储量 $9152 \times 10^8 \text{ m}^3$,一个万亿立方米岩性大气区已经形成。2010年川中须家河组天然气产量达 $13 \times 10^8 \text{ m}^3$,成为四川盆地继石炭系之后又一重要的增储上产领域。

研究表明,四川盆地须家河组天然气剩余资源量约 $4.4 \times 10^{12} \text{ m}^3$,剩余勘探潜力巨大。广安、合川—安岳、营山、蓬莱、剑阁、西充—仁寿、平泉—成都、乐山—威远、龙岗9个区带是川中岩性大气区的有利勘探区带,川中岩性大气区是四川盆地天然气增储上产的主要战场之一。

本专著共分八章:绪论概括了本书著的主要成果;第一章论述了区域构造背景、盆地结构与性质;第二章论述了地层划分对比、沉积相特征和储集砂体展布;第三章论述了烃源岩发育特征和资源潜力;第四章论述了储层特征、形成主控因素及有效储层分布特征;第五章论述了气藏类型、分布特征及主控因素;第六章介绍了针对须家河组的勘探思路与方法,以及勘探配套技术系列;第七章分析了勘探潜力,指出了下步勘探方向。

本专著是在杜金虎教授统一组织下完成的:第一章由魏国齐、李志荣、李传新编写;第二章由杜金虎、施振生、杨威编写;第三章由邹才能、李伟、胡国艺编写;第四章由杨威、何海清、谢武仁编写;第五章由杜金虎、魏国齐、焦贵浩、王志宏编写,第六章由徐春春、张健、谢继容编写;第七章由魏国齐、沈平编写。全书由杜金虎、魏国齐统稿,最后由杜金虎定稿。

在撰写过程中,得到了中国石油勘探与生产分公司、西南油气田分公司、中国石油勘探开发研究院、川庆钻探公司等单位的大力支持,得到了赵政璋教授的悉心指导,高瑞祺教授、赵化昆教授、冉隆辉教授、顾家裕教授等对书稿提出了许多宝贵的意见,在此一并致以最衷心的感谢。

由于四川盆地上三叠统须家河组天然气地质条件极为复杂、资料众多,加之时间短促,作者水平有限,本专著的一些观点,不妥之处,敬请批评指正!

第一章 盆地结构性质与演化

四川盆地是一个大型叠合盆地,经历了从元古宙到中生代早期漫长的海相克拉通和中—新生代陆相演化过程。晚三叠世是盆地由海相到陆相的重要变革期,上三叠统须家河组盆地为统一稳定克拉通基底之上发育的前陆盆地。盆地具有小冲断、大斜坡的结构特征。盆地形成经历了4个演化阶段,盆地边缘褶皱变形作用强,冲断构造较为发育;盆地内部以整体升降为特征,沉积地层没有显著构造变形,发育大面积平缓的斜坡构造,为大面积岩性气藏的形成奠定了基础。

第一节 盆地性质与基底特征

三叠纪晚期,受印支期扬子板块与华北板块碰撞以及羌塘陆块与扬子板块碰撞拼合的影响,盆地受力环境从拉张转变为挤压,盆地性质也经历了重大转变,由海相克拉通盆地过渡为陆相盆地,上三叠统须家河组盆地性质为统一稳定克拉通基底之上发育的前陆盆地。

一、区域构造背景和盆地性质

四川盆地作为扬子克拉通的一部分,镶嵌于中国大陆的聚合拼贴构造之中,形成演化受到周边小型克拉通不同时期、不同位置以及不同方式的聚合拼贴过程的影响和控制。盆地周边较大的地块有华北板块、秦岭地块、羌塘—昌都地块、松潘—甘孜地块,其间还夹有众多微小断块和小型地体(图1-1)。

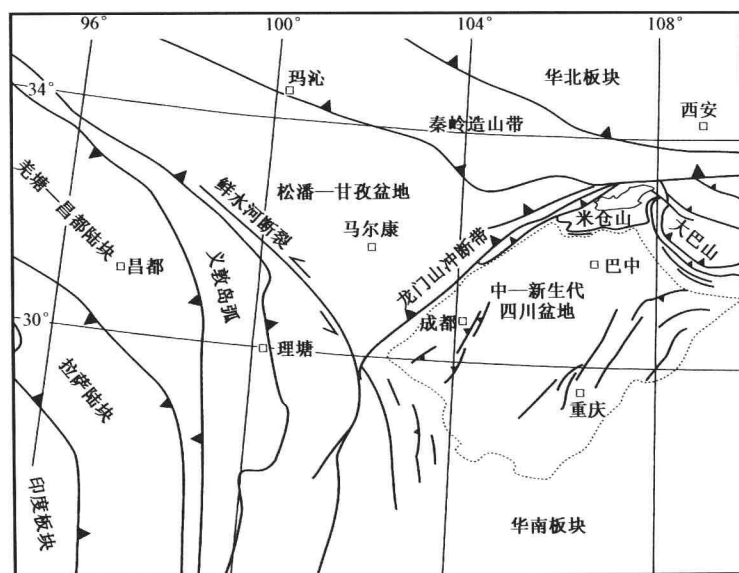


图1-1 四川盆地及其周缘构造背景图

四川盆地在经历了元古宙到中三叠世漫长的海相克拉通演化后,晚三叠世由于盆地与陆缘地体碰撞拼合,盆地构造格局和沉积环境都发生了巨大变化,盆地由此进入了陆相盆地沉积演化阶段。扬子地块分别与西面的羌塘地块自北西向南东和北面的华北地块自北而南两个方向发生高角度的碰撞作用,造成扬子地块西侧和北缘岩石圈发生强烈挤压、挠曲和沉降形成晚三叠世川西周缘前陆盆地。

一方面,松潘—甘孜盆地东部受到四川克拉通块体的阻挡,沿四川克拉通西侧北东向边界向南东方向仰冲,同时伴以左行走滑,造成龙门山的快速隆升和向盆内冲断,形成龙门山前陆冲断带。受华北板块南北向主动挤压影响,松潘—甘孜褶皱带向东挤出,使得龙门山前陆冲断带沿四川克拉通边界自北向南延伸发展,构造变形具有北强南弱的特点。北段表现为典型前陆盆地的结构与构造特征,从龙门山向四川克拉通方向,前陆盆地的冲断带、前缘凹陷、前缘斜坡和前缘隆起发育完整,前陆盆地南段在三叠纪晚期前陆盆地的基础上主要表现为新生代的构造变形。

另一方面,由于龙门山冲断带强烈的逆冲推覆作用,其前缘在构造载荷下发生强烈挠曲沉降,盆地的沉降、沉积中心位于川西都江堰、江油至川北广元一带及其以西的地区,快速沉积了上三叠统须家河组巨厚的磨拉石建造,并发育有大套的砾岩层,主要表现为陆相冲积扇和河流沉积体系。川中和川东北地区主要为受龙门山逆冲推覆作用远端效应影响的前陆斜坡区,主要表现为河流三角洲沉积体系。

二、盆地基底特征

1. 基底断裂特征

研究表明,四川盆地晚三叠世前陆盆地的基底断裂主要包括龙门山断裂、城口断裂、七曜山断裂、华蓥山断裂等4条断裂(图1-2),其中前三者为盆地周缘断裂;后者为盆地内部大川中和川东地区的分界断裂。这些断裂对须家河组沉积及构造格局具有重要的控制作用。

1) 龙门山断裂

龙门山断裂带形成主要形成于印支期,受到华北板块由北向南、羌塘板块由南向北的双向推挤,在松潘—甘孜褶皱带和四川盆地之间形成一系列走向北东的逆冲走滑断裂带。龙门山断裂带自西向东发育三组北东走向的主干断层,分别为青川—茂汶断裂、北川—映秀断裂和安县—灌县—双石断裂,断裂成背驮式向盆地方向发展。北川—映秀断裂也称为中央断裂,是龙门山冲断带内最重要的逆冲断裂,一般将其作为扬子地台的西界,是龙门山造山带和川西前陆盆地的边界断裂。龙门山断裂带呈北东南西向延伸,纵向上切割深、规模大、延伸远,断裂带两侧的沉积建造和地层厚度都有明显差异,控制着盆地沉积盖层由西向东的相变。

2) 城口断裂

断裂带在印支期由于南秦岭地块与扬子板块碰撞而形成,燕山期重新活动,为大巴山弧形构造带最重要的一条断层带,是分割南秦岭与扬子北缘前陆复合褶皱—冲断带的分界断层。断裂带表现为大型逆冲断层体系,沿南秦岭区震旦系底部滑脱形成,上盘下震旦统南沱组冰碛岩自北向南推覆于扬子区古生界—中生界地层之上。断裂两侧构造特征呈现明显的

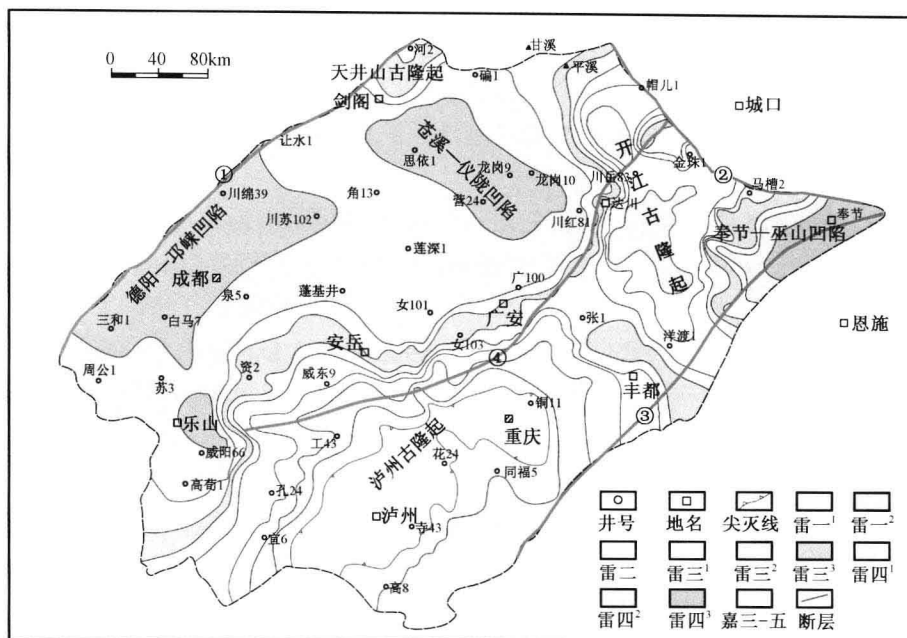


图 1-2 晚三叠世沉积前古地理图

① 龙门山断裂;② 城口断裂;③ 七曜山断裂;④ 华蓥山断裂

不同,该断裂是中生界出露的北界,其北除沿红椿坝一线零星出露外,基本未见大面积出露;而其南除少量逆冲断层上盘底部或背斜核部出露古生界外,其他全部为中生界出露区。

3) 七曜山断裂

一般将其作为四川盆地东界,地球物理场上两侧有明显的差异,盆地断面上可见岩石圈被断裂错开,但基底断裂并无明显落差现象。

4) 华蓥山断裂

华蓥山断裂为早期发育的古断裂,印支期和燕山期继承发展,最终形成现今规模大、延伸远的华蓥山断裂。它把川中和川东构造区截然分开,同时对盆地内须家河组沉积展布也起着重要的控制作用。华蓥山断裂以西便是平缓的大川中斜坡带。

受大断裂影响,上三叠统盆地主要发育北东向和北西向以及东西向和南北向断层。北东向断层主要发育在龙门山山前冲断带、川西凹陷带和川东高陡构造带,北西向断层主要发育在盆地东北部的大巴山前缘以及盆地西南部边缘的汉王场构造和五指山构造等区域。东西向断层则发育在川中平缓构造带内的广安构造、南充构造和营山构造等区域。

2. 基底构造及岩性特征

上三叠统前陆盆地基底主要为中三叠统雷口坡组及其以下的海相碳酸盐岩地层。总体上呈北东方向展布的构造格局,形成北东—南西向的隆起与坳陷。大致以华蓥山断裂为界,东西差异明显,华蓥山断裂以西地区(包括大川中地区和龙门山前冲断带)是主要坳陷区,北部为苍溪—仪陇凹陷,南部为德阳—邛崃凹陷。以东地区主要为隆起区,其南部为泸州古隆起,北部为开江古隆起。

华蓥山断裂以西地区基底地层主要为中三叠统雷口坡组,以雷四段为主,靠近华蓥山断裂地层自西向东逐渐变老,依次为雷四、雷三、雷二和雷一段(图 1-2)。其中雷四段为浅灰、黄灰色白云岩夹薄层硬石膏及少量泥灰岩;雷三段为深灰色薄层—厚层石灰岩与盐岩层;雷二段为灰色泥质白云岩与硬石膏互层;雷一段为灰、深灰色薄—中厚层泥质白云岩、白云岩夹页岩、硬石膏,底部为俗称“绿豆岩”的硅钙硼石。

华蓥山断裂以东地区基底地层主要为下三叠统嘉陵江组嘉三—嘉五段和中三叠统雷口坡组。南部的泸州古隆起为北东向大型背斜构造,核部出露地层较老,为嘉三—嘉五段,其中嘉三段岩性为灰、深灰色中厚层白云岩与硬石膏互层,嘉四段为厚层硬石膏夹灰褐色、灰色白云岩、石灰岩,嘉五段为深灰石膏质白云岩、鲕状灰岩夹硬石膏层。翼部出露地层为雷一、二段。北部的开江古隆起北西向背斜构造,核部出露地层相对较新,主要为雷口坡组雷一段,翼部出露地层为雷二、三段。

第二节 上三叠统盆地构造单元特征

根据盆地结构和断裂展布,上三叠统盆地可划分为大川中构造带和盆地周缘构造带两个大的构造单元,大川中构造带包括川中低缓构造带和川西凹陷带(图 1-3)。须家河组盆地构造特征与地表构造具有较好的相似性,各段构造具有一定的继承性,各构造单元各具特征。

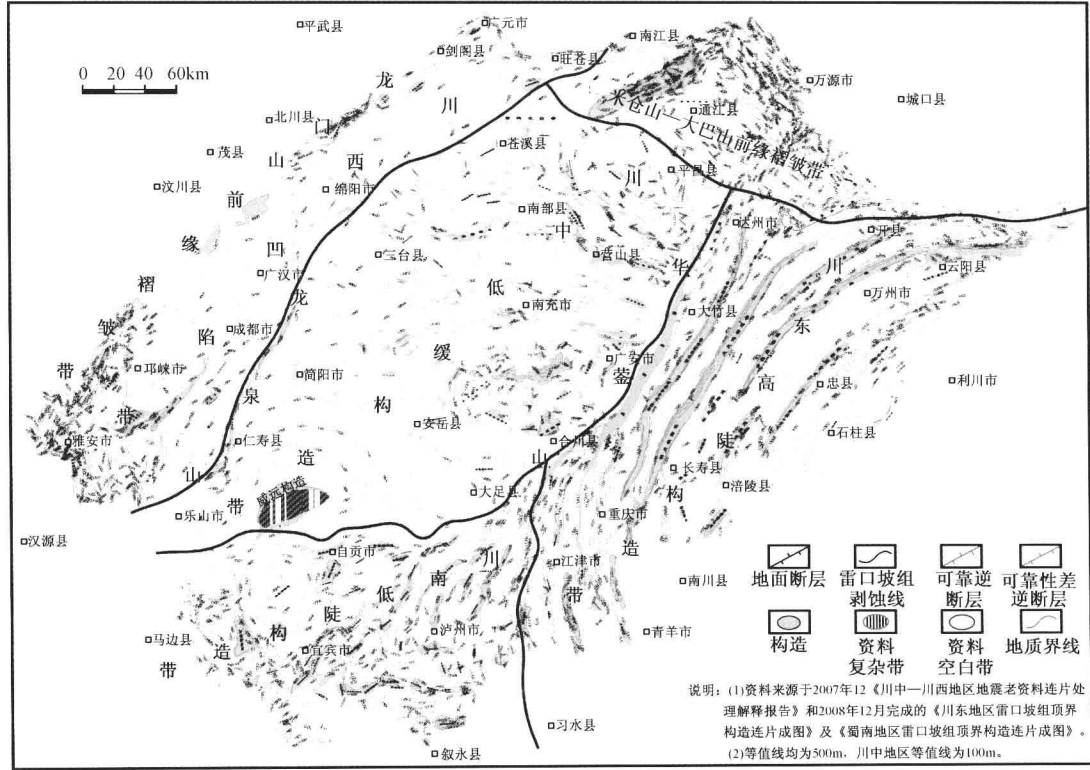


图 1-3 四川盆地须家河组构造单元划分图

一、大川中构造带

大川中构造带位于四川盆地中西部,包括川中低缓构造带和川西凹陷带,总面积约 $7.9 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图 1-3)。

1. 川中低缓构造带

川中低缓构造带位于华蓥山断裂以西,龙泉山断裂以东,北抵大巴山、米仓山山前带,南抵乐山—宜宾的菱形断褶区(图 1-3),面积 $6.0 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。构造带大断裂不发育,高陡构造不发育。基底属于硬性基底,地表无大的断裂,上覆沉积盖层地层倾角小,变形强度较小,现今构造褶皱强度较弱,圈闭闭合度较小(图 1-4)。

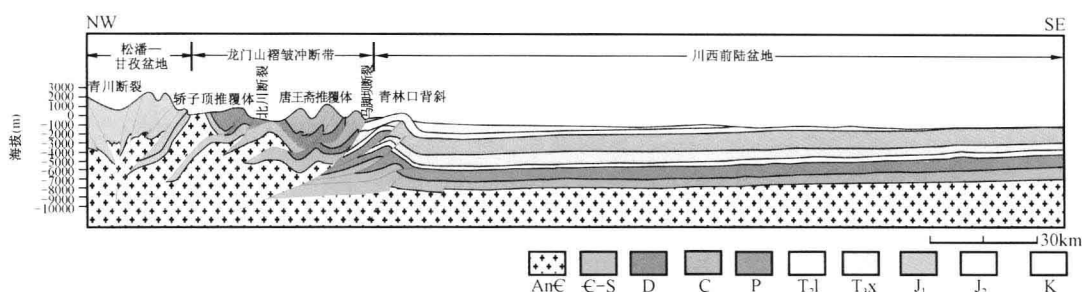


图 1-4 北龙门山冲断带—川中复合隆起的地震测线解释

川中低缓构造带发育的断裂大多为东西走向,断层长度在 20 ~ 50km,断层落差在 40 ~ 600m 之间,断层延伸较短,落差较小,控制了川中低缓构造带内东西向构造格局。断层主要发育于广安、南充和营山等构造区域。

广安构造断层发育于构造轴部,呈近东西向展布,断面倾向南,断开须家河组以上地层。该断层将广安构造分为南北两个高点,控制着广安主体构造的圈闭面积,断层延伸长度大于 31.5km,落差为 40 ~ 350m。广安构造北翼断层也呈近东西向展布,控制着广安构造北高点圈闭面积,该断层断面倾向南,断开须家河组以上地层,断层长约 20.6km,落差 20 ~ 380m。广安断层对于区内构造—岩性圈闭的形成及油气富集起重要作用。

南充构造带断层位于构造东倾没端,由西向东断层走向为近东西向转为北西向,断面北倾。断开珍珠冲段底至须家河组底,断层长约 22.9km,落差 40 ~ 160m。

营山构造带断层位于构造东北翼,呈北西向或北西向展布,断开须家河组以上地层,向上均消失于沙溪庙组内,未与地面连通。断层长度约 48.3km,落差 40 ~ 600m。断层将营山构造分成了南北两部分,并在这些断层之间形成了较多的小潜高。

根据构造形态和断裂特征,川中低缓褶皱构造带可进一步划分为三个次一级构造带,由南向北依次为威远—龙女寺构造带、南充构造带和营山—仪陇构造带。威远—龙女寺构造带整体为北东—南西走向,西南边的威远构造呈穹隆状延伸到安岳、乐至等地区。南充构造带东侧呈近东西向,向西向南逐渐变为北东—南西向,主要包括八角场构造和公山庙构造,同时还发育一些低幅度的局部构造。营山—仪陇构造带呈近东西向,向东北和西北逐渐过渡为北西—南东向构造,在西侧靠近川西凹陷存在部分近东西向构造,而在东北侧也存在个别北东—南西向构造。

川中低缓构造带须家河组底海拔由西向东逐渐变浅,体现了前陆盆地结构特征,在东侧的广安构造等前缘隆起带须家河组底海拔一般在-2000m左右,而在八角场构造等前缘斜坡带须家河组底海拔在-3000m左右。

总体来看川中低缓构造带构造变形较弱,区内只有威远构造核部出露须家河组地层。须家河组在川中地区勘探面积巨大,近几年在广安、合川、潼南和安岳取得了勘探成功。近期在蓬莱镇、桂花园等须家河组也取得了勘探突破,川中斜坡带展现了良好的勘探潜力。

2. 川西凹陷带

川西凹陷带位于四川盆地西部,面积约 $1.9 \times 10^4 \text{ km}^2$,东以龙泉山断裂、三台—巴中隐伏断裂为界,西与龙门山冲断带相接,北至米仓山前缘,南至盆地边界(图1-3)。川西凹陷带构造形态受北东向断裂影响也呈北西—南东向,存在东西分带南北分段特征。西部主要为前陆盆地的前缘冲断带扩展区,变形相对较强,断褶构造发育。东部为川西坳陷的主体,包括梓潼向斜和成都盆地,地层平缓,构造简单。

川西凹陷带平面上自北向南可分为北部梓潼凹陷、中部彭灌凹陷和南部名山凹陷。其中北部梓潼凹陷在经受古近纪末构造运动改造后,整体抬升而遭受剥蚀,现今呈一大型向斜构造形态。凹陷区地表主要为白垩系,地下侏罗系—上三叠统发育完全,构造变形强度弱,局部构造发育少。

中部彭灌凹陷地表出露主要是第四系,地下依次发育白垩系、侏罗系和上三叠统。中部彭灌凹陷形成早,但后期随北部梓潼凹陷、南部名山凹陷的产生,凹陷区范围逐渐缩小。中部彭灌凹陷区内,大部分地层具西厚东薄的“楔状”沉积特点。其西部地层埋深大、构造变形程度弱,是累计地层厚度最大的地区。东部埋深相对较浅,并且区内受到龙泉山断裂带影响,构造变形程度相对较强。

南部名山凹陷地表出露第四系—古近系—白垩系,后经喜马拉雅期构造运动强烈改造,西缘部分被卷入龙门山前缘断褶带,东缘部分被卷入龙泉山隆起,现今凹陷特征不明显。该区受到喜马拉雅期构造活动影响较强,与中部、北部凹陷相比,构造变形程度相对较强,特别是断裂构造较发育。

此外,在各凹陷之间发育有地壳差异引起的低幅宽缓隆起带,包括绵竹—盐亭隆起带和邛崃—新津隆起带。其中绵竹—盐亭隆起带位于北部梓潼凹陷和中部彭灌凹陷之间,是伴随北部梓潼凹陷形成演化而产生的一个近东西向宽缓隆起带,地表出露地层主要是白垩系。邛崃—新津隆起带位于中部彭灌凹陷与南部名山凹陷之间,地表出露地层主要是第四系或白垩系,该隆起带大部分地区缺失下白垩统,或者下白垩统的剥蚀残留厚度很薄。

二、盆地周缘构造带

盆地周缘构造带包括龙门山前缘褶皱带、米仓山—大巴山前缘褶皱带、川东高陡构造带和川南低陡构造带(图1-3)。山前褶皱带是由造山带向盆地方向逆冲推覆作用形成的一系列叠瓦状冲断岩席和双重构造,冲断带由断层、褶皱、推覆体和滑覆体组成。

1. 龙门山前缘褶皱带

龙门山前缘褶皱带面积约 $1.1 \times 10^4 \text{ km}^2$,以青川—茂汶断裂、北川—映秀断裂和安县—灌县—双石断裂为界,将前陆冲断带划分为三带:韧性变形剪切带、叠瓦状逆冲推覆带和冲

断前锋带。韧性变形剪切带和叠瓦状逆冲推覆带地层剥蚀严重,须家河组主要发育于冲断带前锋带。

龙门山前缘褶皱带南段和北段在构造背景、变形强度、变形层次、变形历史等方面都有一定差异,使其显示出明显的南北分段变形特征。龙门山构造带北段大致从广元到安县一带,主要出露的是被强烈褶皱和冲断变形的古生界和三叠系。根据逆冲断层系的厘定和变形构造特征,并结合地层单元之间的叠置关系,龙门山北段地表构造从东北向西南可以划分出三个基本的构造单元:轿子顶推覆体、唐王寨推覆体和冲断前锋构造带。其冲断前锋构造包括了矿山梁、天井山、青林口和中坝等典型背斜构造(图1-4)。前锋构造圈闭发育,保存条件好,是前缘褶皱带勘探的主要目标区。

龙门山南段大致从安县到宝兴一线,其构造特征与北段有着显著差异,表现为一系列基底卷入式的叠瓦状冲断构造(图1-5)。与龙门山北段不同的是,在龙门山南段东部出露的三叠系与侏罗系呈连续沉积的整合关系,说明该地区受三叠纪晚期印支期构造活动影响较小。在平面上可以划分出三个由前寒武纪变质岩和杂岩体为核心的大型推覆体,即彭灌杂岩推覆体、宝兴杂岩推覆体和五龙杂岩推覆体,以及冲断前缘的飞来峰构造带。据地表和地震成果,冲断前缘构造带可划分为四个三级构造,分别是鸭子河构造、大邑构造、石板滩构造和雾中山构造。

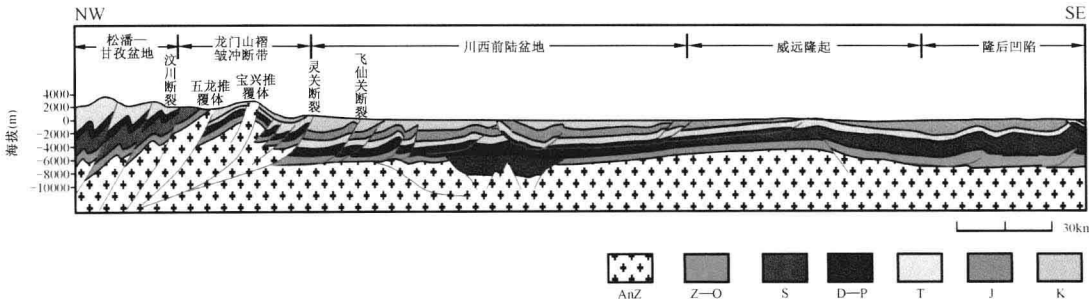


图1-5 南龙门山冲断带—威远隆起—泸州构造的地震测线解释

飞来峰构造是龙门山南段的一鲜明构造特征,沿着褶皱冲断带前缘发育了大大小小20多个飞来峰构造,延续达约260km。通过对南段的前锋构造的分析,可以看出龙门山南段的前锋构造在后期的冲断作用下形成,表现为较大规模的断层转折褶皱。

2. 米仓山—大巴山前缘褶皱带

米仓山—大巴山前缘褶皱带位于米仓山—大巴山前,面积约 $1.3 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中米仓山前缘带以东向西构造展布为主,西与龙门山—松潘—甘孜构造带相连;大巴山前缘带构造展布为弧形构造带,西与米仓山相接,东与川东高陡构造带毗邻,整体面貌表现为向西南凸起的弧形构造带。地表出露侏罗系—白垩系,山前带出露三叠系。

受山前褶皱冲断作用的影响,须家河组构造形态在大巴山前缘呈北西南东向,向西则逐渐过渡为近东西向,整体呈一弧形构造带。在其南端存在一北东南西向构造,被后期的北西南东向断层切割成小块,分析其受力情况,早期此构造可能受来自龙门山冲断带的应力影响,使构造形态呈北东南西向,后期受来自大巴山冲断带应力影响,产生许多小断层,把构造