

https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.260



构造交汇区应力场演化及其对裂缝发育的影响:以川北元坝、通南巴为例

唐永¹, 刘昭茜², 张缘¹

1. 长江大学非常规油气湖北省协同创新中心, 湖北武汉 430100

2. 中国地质大学(武汉)构造与油气教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

摘要: 构造交汇区致密砂岩储层往往受到不同方向、不同期次构造作用力的影响,致密砂岩储层在 multi-epoch 构造叠加改造下,形成不同密集程度、不同规模裂缝,裂缝的叠加改造大大增加了致密砂岩优势储集层刻画难度.川北元坝和通南巴上三叠统须家河组致密砂岩裂缝正是在大巴山冲断带、米仓山隆起、龙门山冲断带联合主导的交汇应力作用下所发育,这些多方向、多期次裂缝影响了川北须家河组天然气的勘探开发.因此准确表征元坝、通南巴区块所处的构造交汇发育部位、特征、成因成为有效表达目标区块须家河组致密砂岩裂缝发育特征及空间分布规律的关键,是有效开发裂缝型气藏前提.利用川北野外构造形迹实测数据,综合地震解释成果分析,明确交汇区构造空间特征,断裂分布的空间转化,并以此为基础分析和模拟构造交汇区不同区域的裂缝发育差异,解析构造交汇区对裂缝的控制作用.在构造应力场约束下,应用随机模拟技术体现裂缝发育区域单条裂缝之间方位偏转规律,表征自然裂缝的随机发育特征.研究结果显示,燕山晚期构造交汇区受到均一的北西-南东向构造应力作用,发育以东北向褶皱(九龙山背斜、通南巴背斜)为主,而喜山期构造交汇区呈现明显的差异:交汇区西部(元坝区块西部)发育北东向断裂,交汇区中部(元坝区块中东部)发育南北向断裂,而构造交汇区的东部(通南巴区块)发育北西向断裂.燕山晚期形成的 NE 向背斜控制裂缝分布,喜山期断裂控缝.构造交汇区自西向东,裂缝发育程度越来越高,控制裂缝的断层由形态简单的单条断层逐渐向由形态复杂单条断层控制、复杂的多条断层控制,裂缝方向也由西部(元坝区块西部)NW 逐渐变化为东部(通南巴区块)NE.构造交汇区西部(元坝区块)主要由单条断层控制裂缝发育;往东构造交汇区中部(通南巴西部),主要由断层的弯曲、转折,以及断层的斜列来控制裂缝的发育;构造交汇区东部(通南巴东部)则主要发育距离较近断层联合控制,局部可见交切断层的交汇部位裂缝发育程度高.

关键词: 构造交汇;应力场;裂缝;砂岩;构造地质学.

中图分类号: P54

文章编号: 1000-2383(2026)05-1861-15

收稿日期: 2025-10-09

Evolution of Stress Fields in Structural Intersection Zones and Its Impact on Fracture Development: A Case Study of Yuanba and Tongnanba Areas in North Sichuan

Tang Yong¹, Liu Zhaoqian², Zhang Yuan¹

1. Hubei Cooperative Innovation Center of Unconventional Oil and Gas, Yangtze University, Wuhan 430100, China

2. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources, Ministry of Education, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China

基金项目: 国家科技重大专项《中西部主要盆地关键期构造变形特征研究》(No.2016ZX05002-006-007).

作者简介: 唐永(1981-),男,讲师,现从事构造应力场地质分析、裂缝地质分析及数值模拟的研究工作. ORCID: 0000-0002-4710-5243.

E-mail: water_0820@163.com

引用格式: 唐永,刘昭茜,张缘,2026.构造交汇区应力场演化及其对裂缝发育的影响:以川北元坝、通南巴为例.地球科学,51(5):1861-1875.

Citation: Tang Yong, Liu Zhaoqian, Zhang Yuan, 2026. Evolution of Stress Fields in Structural Intersection Zones and Its Impact on Fracture Development: A Case Study of Yuanba and Tongnanba Areas in North Sichuan. *Earth Science*, 51(5): 1861-1875.

Abstract: Tight sandstone reservoirs within tectonic intersection zones are shaped by multi-directional, polyphase stresses that generate fractures of variable density and scale. These structural overprints, superimposed on porosity variations from sedimentary and diagenetic processes, introduce strong heterogeneity, complicating reservoir characterization and prediction. Accurate delineation of fracture networks therefore requires systematic analysis of the geometry, evolution, and genetic mechanisms of intersection zones. By integrating field structural measurements with seismic interpretation, it constrained the spatial architecture of intersection zones and simulated fracture variability across subregions. Stochastic modeling under stress-field constraints captured directional deviations between individual fractures, reflecting the intrinsic randomness of natural systems. Results indicate that during the late Yanshanian, NW-SE directed compression dominated, producing NE-trending folds (Jiulongshan and Tongnanba anticlines) that exerted first-order control on fracture development. In contrast, Himalayan deformation was partitioned: NE-trending faults developed in the western Yuanba area, NS-trending faults in the central Yuanba, and NW-trending faults in the Tongnanba area. While Yanshanian folds primarily governed fracture distribution, Himalayan faults became the dominant control. From west to east, fracture intensity increases, with mechanisms evolving from single-fault control (Yuanba) to more complex fault bending, inflection, and en échelon arrangements (western Tongnanba), culminating in dense fracture networks generated by intersecting faults in eastern Tongnanba.

Key words: structural intersection; stress field; fracture; sandstone; tectonics.

0 引言

四川盆地陆相碎屑岩经历了多期构造叠加改造,具有储层非均质性强、油气聚集差异性大等油气地质特征(刘昭茜等,2009;郭彤楼,2013)。不同时期的构造作用在同一位置表现形式不同(唐永等,2015),不同时期的构造作用在不同构造位置的表现形式更加复杂(邓宾,2013;文凯和李传新,2020),对油气的改造作用更强(吴世祥等,2005;邱楠生等,2008;宋庆伟等,2014;王学军等,2015)。这一点在大巴山构造带、米仓山构造带、龙门山构造带的交汇区——四川盆地北缘的元坝区块和通南巴区块表现的较为清晰(罗良等,2015)。元坝区块和通南巴区块属于多属性构造作用交接部位,该区域须家河组呈现多期构造作用叠加的特征;多期构造作用的形迹特征、分布范围等在元坝和通南巴地区表现形式存在较大的不同,而同期构造作用方式、波及范围也存在差异(文凯和李传新,2020)。构造交汇区东部主要形成NE向构造被NW向构造切割(通南巴与元坝东部),中部则主要为近SN向构造发育(元坝中部),西部发育NE向构造(元坝西部),这种差异性目前还没与区域构造进行很好的结合(图1)。同时交汇区自晚侏罗世以来发生多期构造迁移与叠加作用,致使元坝区块和通南巴区块须家河组致密气藏小型断裂和裂缝较为发育(郭彤楼,

2013;陈龙博等,2017;刘昭茜等,2019;蒋有录等,2020),由于裂缝对须家河组致密砂岩储层改造,中石化南方分公司在两个区块陆相层系中均获得重大突破(郭彤楼,2013)。由于小型断裂、裂缝发育的复杂性和特殊性,导致在裂缝成因、力学机制、不同期次裂缝对油气运移、聚集成藏的影响等方面的认识上存在显著差异(樊靖宇等,2009;张冲等,2015;范存辉等,2017;秦启荣等,2017;曹环宇等,2018;李虎等,2018;王威和凡睿,2019;蒋有录等,2020)。同时这些多方向、多期次裂缝的发育严重影响须家河组天然气的勘探开发,元坝区块元坝1井测试产气 $1\ 152\text{m}^3/\text{d}$,元坝101井严重漏失(裂缝发育层);通南巴区块马2井产气 $3.58\times 10^4\ \text{m}^3/\text{d}$ (裂缝发育层),川涪82仅仅产气 $1\ 262\ \text{m}^3/\text{d}$ 。这也很好地体现了四川盆地北缘交汇区裂缝发育控制的多因素性、成因机制解析的多元性以及空间展布的变异性。因此对元坝和通南巴区块裂缝特征以及成因机制的比较分析,明确两者之间的差异性,理清构造活动对交接区裂缝发育的控制。对揭示不同构造带活动期次,研究多构造带结合部复杂构造活动对致密油藏的改造、油气富集的调整具有重要意义。

1 地质背景

元坝区块、通南巴区块同属四川盆地北缘,处于川北坳陷内,其构造变形受西侧龙门山冲

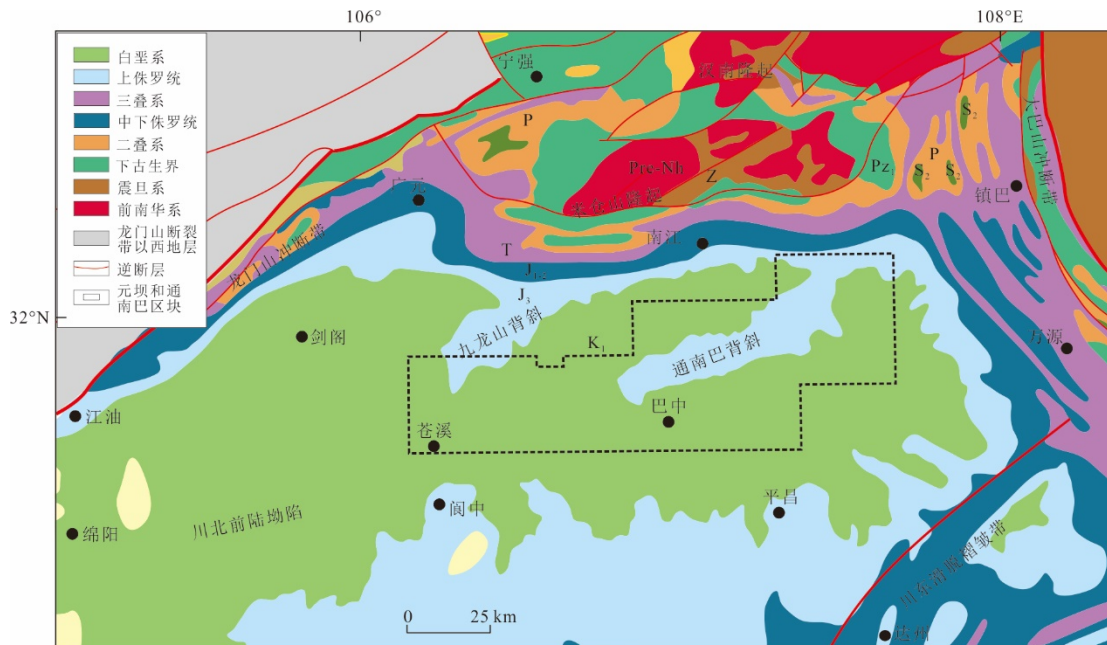


图1 构造交汇区中的元坝、通南巴区块

Fig.1 Yuanba and Tongnanba blocks in the structural intersection area

断带、北侧米仓山构造带和东侧大巴山冲断带联合控制(马德龙等, 2023)(图1). 大巴山弧形冲断构造带位于其东北, 与之对应的西北侧为龙门山褶皱冲断构造带, 南侧构造低缓逐渐过渡为川中稳定构造区, 北侧为米仓山冲断构造带(张艳妮, 2015; 刘昭茜等, 2019). 印支期, 四川盆地由海相沉积转化为接受碎屑岩沉积, 整个川北进入前陆盆地发育阶段, 周缘崛起的龙门山(贾东等, 2003; 刘树根等, 2003)、米仓山(程顺有等, 2003; 张国伟等, 2004; 许长海等, 2010; 刘树根等, 2011; Lei *et al.*, 2012)、大巴山向川北供给大量物源(罗良等, 2015), 沉积厚度较大的碎屑岩, 至下而上一次为上三叠统须家河组灰白色长石-石英砂岩、侏罗系紫色粉砂质泥岩与薄层粉砂岩间互、白垩系棕红色钙质粉砂岩(高志勇等, 2012). 燕山期周缘造山带向盆内挤压持续加强, 以龙门山构造带、米仓山构造带为活动的主体, 川北形成了一系列NE向构造, 如九龙山背斜、池溪向斜、通南巴背斜. 喜山期米仓山构造带往盆内挤压作用结束, 而龙门山北段持续活动, 大巴山构造带再次活动, 形成了NW、NE两个方向力源共同作用于川北坳陷, 形成复杂的构造格局(沈传波等, 2007; 邓宾等, 2014; 刘昭茜等, 2019). 整个川北构造交汇区为白垩系与侏罗

系相间出露, 主要为通江复向斜内的九龙山背斜和通南巴背斜改造所致(吴世祥等, 2005; 施炜等, 2007; 裴先治等, 2009), 并且由九龙山背斜→池溪向斜→通南巴背斜构造的展布方向由NE向逐渐偏转为NEE向. 表明米仓山、大巴山、川东构造带联合扰动对川北构造格局的控制.

2 构造交汇区特征

受米仓山、大巴山、龙门山多方向挤压冲断的影响, 元坝、通南巴区块上三叠统须家河组构造改造程度高, 变形复杂, 且致密砂岩(杨烁等, 2020), 裂缝极为发育(郭彤楼, 2013), 是川北构造交汇区裂缝研究的理想“实验田”. 构造交汇区(元坝、通南巴区块)主体以一系列近NE向宽缓褶皱和局部小型的NE向断裂面貌呈现, 如九龙山背斜、池溪向斜、通南巴背斜、通江向斜(文凯和李传新, 2020), 局部小型NE向断裂仅发育元坝区块以西范围, 倾角大部分在 80° 以上, 断距为数十米-数百米不等, 延伸长度为2~5 km. NE向的主体构造被晚期的SN向和NW向构造所改造, 不同部位改造方式和程度有所差异. 元坝区块的中段为SE和SW向挤压作用交汇的前锋区(同时期不同方向作用力相互干扰影响), 元坝区块中段主要发育SN向构造(发育于九

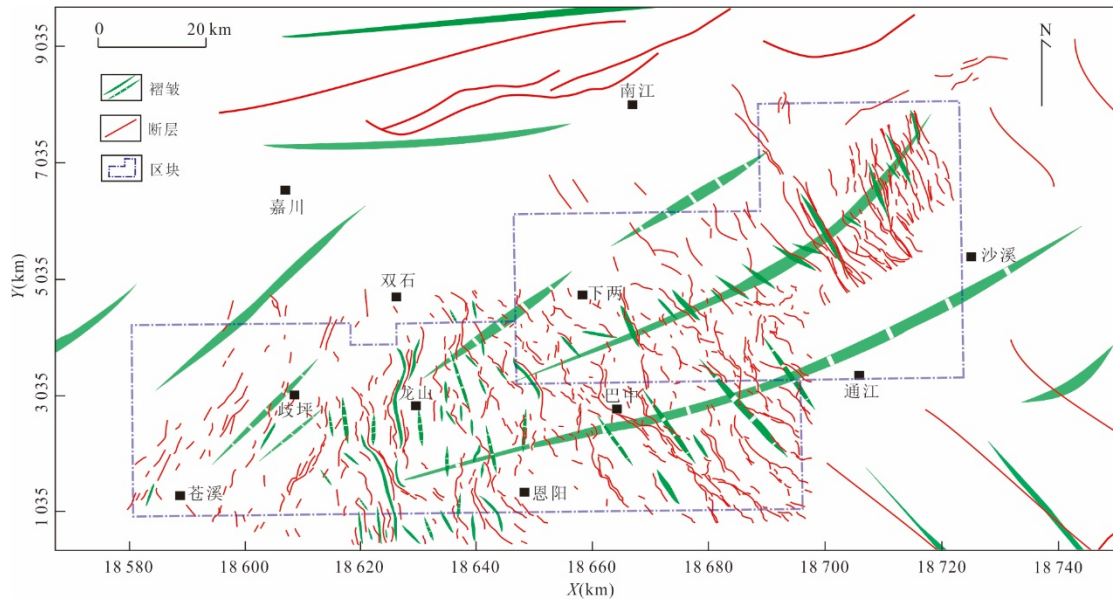


图2 研究区构造叠加改造特征(须家河组顶面构造)

Fig.2 The characteristics of structural superposition and reformation in the structural intersection area (the surface structure of the top Xujiuhe Formation)

龙山背斜和通南巴背斜交接部位), SN 向构造延伸长度相对较小, 仅仅影响 2~4 km. 元坝区块东段和通南巴区块则成为 SW 向挤压作用交汇的主体区, 表现为 NE 向构造被 NW 向构造叠加改造, NE 向构造被切割改造的长度在 5~8 km, 局部可达十几公里. 元坝西段为 SE 挤压作用的远程效应区, 表现为 NE 向构造叠加加强发育区, 除 NE 向构造发育以外, 并无其他构造形迹(图 2).

3 构造交汇区应力场地质分析

3.1 利用褶皱分析应力

川北地区的主体构造为北西向大巴山弧形构造带及其前缘带、北东向龙门山前缘褶皱带和近东西向米仓山前缘褶皱带, 褶皱为纵弯褶皱. 本次研究针对川北、米仓山、大巴山及叠合区域的褶皱的形态、方位和发育的强度进行了分析, 弄清不同期次褶皱强度、两翼产状及轴向等特征.

北西向构造带的通江北褶皱形成的主应力: $\sigma_1=49^\circ$, $\sigma_2=323^\circ$, $\sigma_3=140^\circ$; 北东向构造带的通南巴背斜的褶皱形成的主应力: $\sigma_1=123^\circ$, $\sigma_2=34^\circ$, $\sigma_3=305^\circ$; 北东向构造带的九龙山背斜的褶皱形成的主应力: $\sigma_1=148^\circ$, $\sigma_2=58^\circ$, $\sigma_3=345^\circ$; 东西向构造带的大两会背斜形成的主应力: $\sigma_1=11^\circ$, $\sigma_2=328^\circ$, $\sigma_3=131^\circ$. 来自正北的构造作用导致川北形成近东西向构造, 如大两会背斜, 北西方向的构造挤压应力致

使川北形成北东向褶皱, 北东方向的挤压作用导致川北形成北西向构造, 如通江北背斜. 北东向褶皱, 被北西向褶皱所改造, 两者叠加干涉形成“十”字形构造可见, 这一现象在通江地区表现的较为明显, 如通南巴背斜, 通江向斜一带(表 1, 图 3).

3.2 利用擦痕应力分析

Arthad (1969) 提出根据断层面法线和擦痕确定的平面确定主应力方位. 本研究区及邻区断层较发育, 断面多表现压性结构面特征, 并在结构面、以及滑抹晶体上表现出多期擦痕, 这些擦痕是断层多期活动的直接证据. 通过对研究区内大量的主干和次一级断层擦痕的测量, 可以较好地恢复不同时期构造应力的主要方向.

米仓山前缘及通南巴背斜之间擦痕大圆图反映出最大主应力北北东和近南北优势方向, 而且多具有两期以上的擦痕, 从擦痕反映出的最大主压应力方向主要有两个方向段, 一是北北东-北东-北东东方向段, 二是米仓山以南及至盆内最大主应力优势方向为近南北向兼有北北西方向段, 这说明受到了秦岭-大巴山向四川盆地北东-南西向多次挤压并受米仓山构造带或龙门山构造带对研究区弱改造的轻微影响(表 2, 图 4).

三江镇、老屋里最大主应力方向为 $3^\circ \angle 2^\circ$, 这两点均为近东西向大两会背斜的翼部, 说明米仓山受到了近南北的挤压应力作用. 赤江乡最大主应力方

表 1 研究区及相邻区域褶皱应力场分析
Table 1 Statistics of the fold stress analysis in the structural intersection area

背斜	数据点	两翼产状(°)	两翼优势方位(°)	轴面(°)	主应力方向(°)		
					σ_1	σ_2	σ_3
大两会	12	185/71, 185/69, 191/73, 190/70, 202/77, 220/65, 218/63, 11/63, 12/71, 15/72, 12/65, 15/78	192/71 11/68	298/84	11/ 22	328/ 14	131/ 62
九龙山	12	132/45, 159/52, 145/25, 154/71, 153/72, 159/56, 144/66, 325/40, 300/12, 342/6, 302/12, 332/5	150/55 322/15	329/80	148/ 13	58/ 23	345/ 68
通南巴	15	275/36, 290/57, 305/56, 310/37, 318/21, 295/31, 288/22, 135/65, 150/30, 133/60, 123/70, 138/46, 129/48, 109/55, 112/35	128/51 336/33	303/80	123/ 8	34/ 8	305/ 70
通江北	6	285/51, 268/55, 260/58, 66/75, 58/66, 63/76	61/33 258/20	255/77	49/ 3	323/ 5	140/ 85

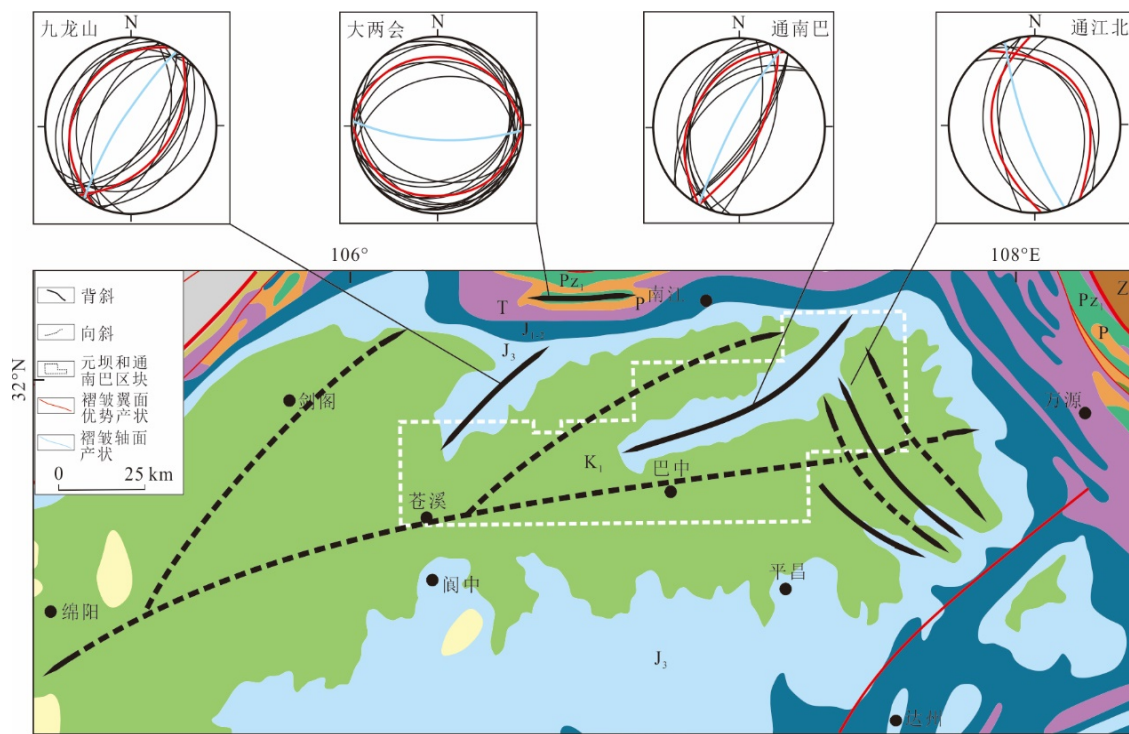


图 3 褶皱两翼优势方位和轴面产状分析

Fig.3 Analysis on the dominant azimuths of the two limbs of the fold and the attitude of the axial plane

向为 $330^\circ \angle 05^\circ$. 铁溪乡附近最大主应力方向为 $238^\circ \angle 17^\circ$. 可以推测: 中侏罗世以后, 研究区至少经历了两期的构造应力的叠加, 分别为近南北向、北东-南西方向, 形成近东西向褶皱被北西向构造所叠加的现象. 新新乡附近点最大主应力方向为 $32^\circ \angle 47^\circ$, 北东向主应力. 永安-大河周缘最大主应力方向由 $172^\circ \angle 13^\circ$ 变化为 $302^\circ \angle 49^\circ$, 应力

在该处附近由近南北向, 变化至北西-南东向. 永安-大河一带的逆冲断面走向呈弧形, 说明该区内中侏罗世以后, 应力场扰动旋转的存在(图 4).

3.3 构造应力场时间确定

3.3.1 构造时序关系地质分析 传统的构造地质学判断构造发展的时序及构造叠加的先后是最为直接和可靠的证据, 基于这一理论, 我们根据各种

表 2 主要断裂擦痕及应力分析统计

Table 2 Statistics of main fault striations and stress analysis in the structural intersection area

位置	来源	断裂面产状(°)	擦痕产状优势方位(°)	主应力		
				最大主应力(°)	中间主应力(°)	最小主应力(°)
正源乡	实测	215/46	181/41	346/00	256/00	264/88
高阳镇	实测	47/84	333/69	343/06	253/11	099/78
东溪镇	实测	203/83	119/35	341/09	250/04	147/82
水磨乡	实测	341/68	63/18	357/48	267/00	177/49
三江镇	实测	40/45	1/45	3/02	273/02	174/88
新民乡	实测	40/52	38/52	32/47	303/01	214/48
流坝乡	实测	23/62	21/62	158/14	249/06	75/78
赤江乡	实测	217/56	177/49	330/05	240/04	257/86
铁溪乡	实测	195/54	127/28	238/17	148/02	157/83
永安村	实测	88/78	71/76	172/13	259/17	58/73
大河村	实测	237/67	77/57	302/49	61/07	164/81

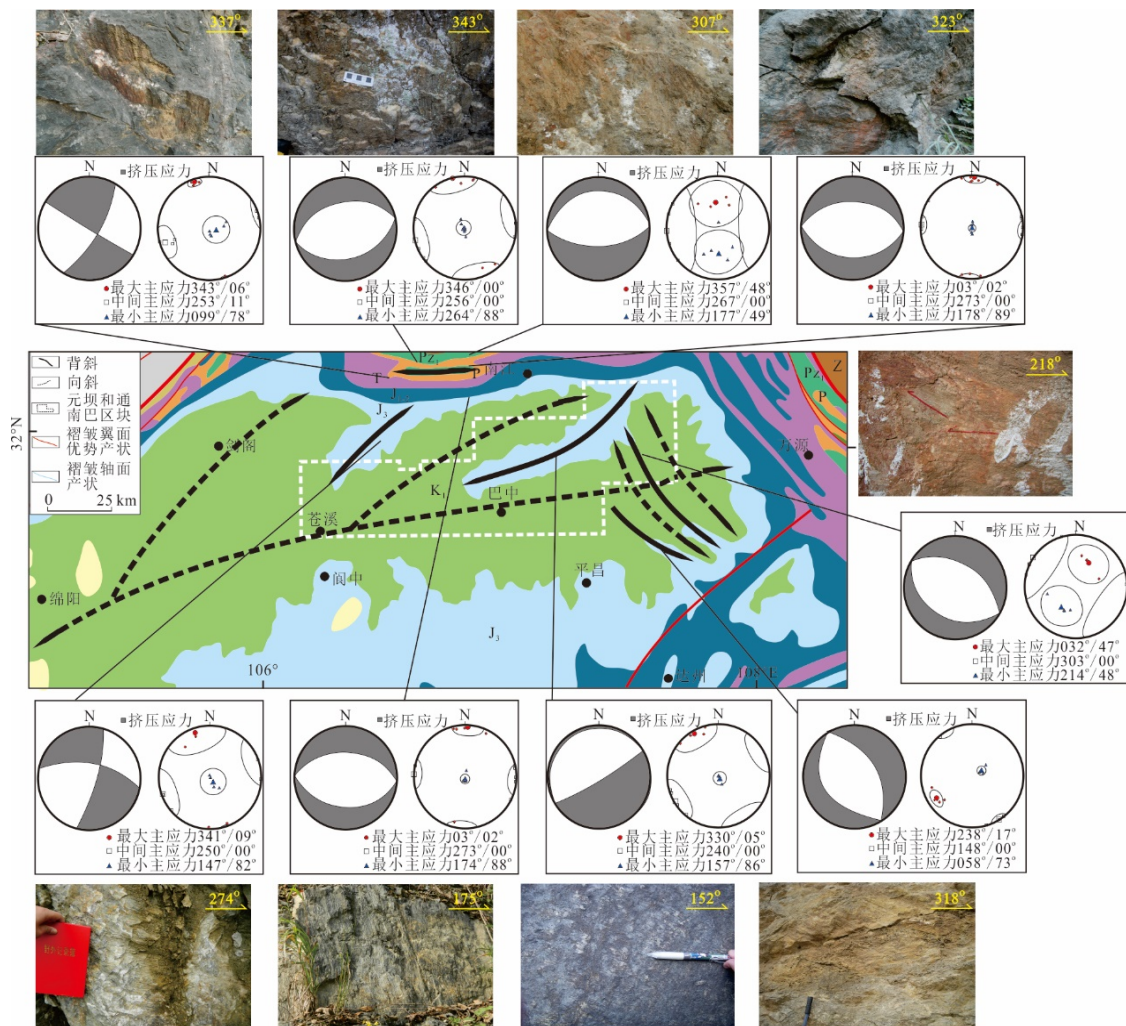


图 4 构造交汇区利用断裂面擦痕构造应力分析

Fig.4 Structural stress analysis using fault plane striations in the structural intersection area

构造活动所卷入不同地质时期的地层、推覆前后地层接触关系、不同期推覆构造间的空间交

切、复合关系等标志来判定。

早中侏罗世-白垩世交汇区主要受到米仓山构

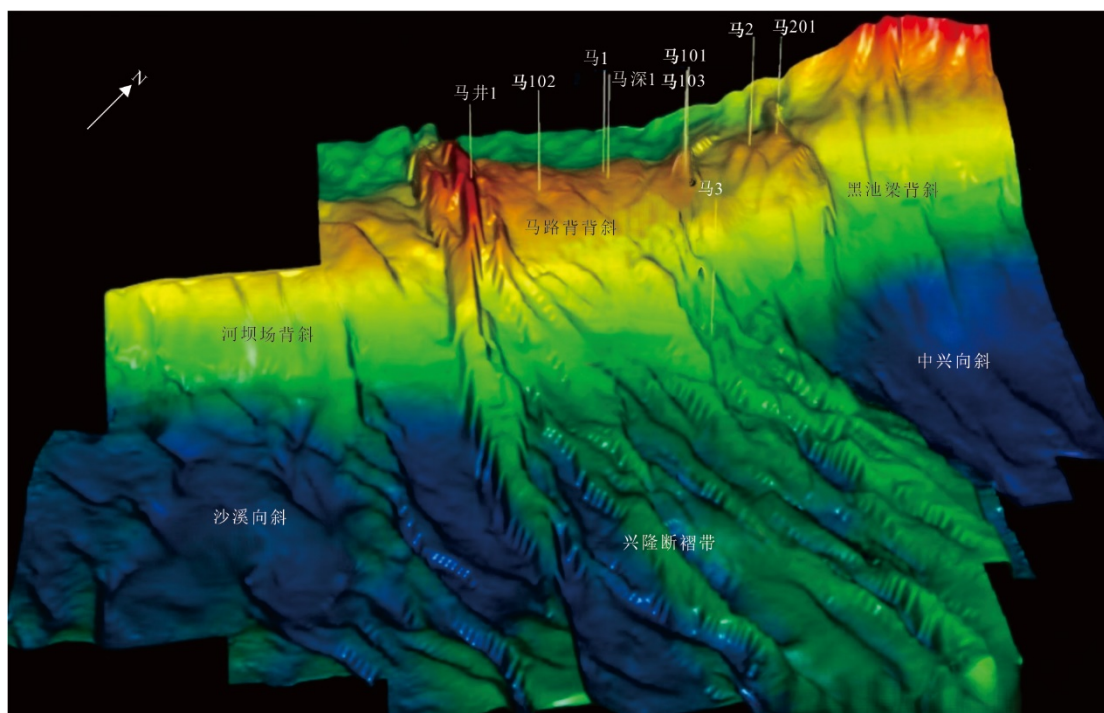


图5 北东向马路背背斜被北西向构造切割

Fig.5 The NE-trending Malubei anticline dissected by NW-trending structures

造活动的影响,东侧的大巴山逆冲挤压仅仅局限于铁溪-巫溪一线以东的区域,西侧的龙门山侏罗纪-白垩纪为构造相对平静期,没有发生强烈的挤压事件.早中侏罗世,由于米仓山褶皱隆升变形强烈,在侏罗系下部沉积了一套砾岩,并角度不整合于下伏上三叠统之上,并在米仓山南缘大部分区域逐渐变化为平行不整合,而四川盆地内部呈现为整合接触.白垩世晚期米仓山构造作用最为强烈,米仓山内部形成大量逆冲褶皱构造,并一直影响到四川盆地北缘,形成北东向展布形态宽缓的褶皱(九龙山背斜、通南巴背斜).

渐新世,米仓山构造活动趋于稳定,而东侧来自大巴山方面的挤压和推覆再次加强,产生前缘带的滑脱褶皱,并与已成型的川东北东向褶皱发生复合,出现北东向构造限制北西向构造发展和北西向构造横跨北东向构造两种类型的叠加复合关系.例如北东向的马路背背斜被北西向构造切割形成“十”字形干涉(图5).与此同时,西侧的龙门山褶皱冲断带发生强烈的隆升挤压,向南东逐渐扩展至川北区域,并在元坝区块中部与大巴山向南西扩展的应力场发生干涉减弱.

3.3.2 裂变径迹的证据 川北褶皱带磷灰石裂变径迹测试显示,该地区在白垩世开始强烈隆升,但

很快就结束了构造隆升.喜山早期川北构造活动比较平静,但大约在10 Ma再次活动隆升.同时,ESR和磷灰石裂变径迹显示,此阶段大巴山逆冲推覆构造由由北东向南西发生了扩展变形,渐新世-中新世(约33~12 Ma)变形扩展到了川北区域(沈传波等,2007).钻井和露头的(U-Th)/He年龄数据同样显示了这一变形演化趋势(邱楠生等,2008).川西前陆在43 Ma左右的快速隆升,说明川西龙门山逆冲推覆带在喜山期影响到四川盆地内部.

通过对川北地区及周缘构造应力方向、期次分析,发现研究区构造应力动力来源与整个川东北地区构造演化密切相关.燕山运动以前川北地区强烈的构造活动主要发生在整个四川盆地周缘,盆内以相对简单的升降运动为主.早白垩世晚期,邻区造山带边缘已褶皱成山,并且山链已推进到南大巴山推覆前缘带和川东构造带.白垩世晚期,大巴山构造带处于停止活动的状态,而川东构造带的持续挤压发展到四川盆地内部,导致川东北区NNE、近EW及NE向节理发育,并形成一系列北东向断裂和褶皱,如东岳寨-双石庙、毛坝-双庙场、铁山-分水岭等.米仓山也扩展至南缘大部分区域,形成九龙山、通南巴背斜.西侧的龙门山构造带则处于相对平静期.

古近纪,早期较为活跃的雪峰山向北西方向的挤压作用力已经停止,构造应力发生了大的转换,大巴山从北东向南西方向的作用力再次活动,龙门山从北西向南东方向的作用力开始扩展至川北,并联合主导川北的构造变形.渐新世晚期,大巴山向南西方向扩展的北东方向作用力影响构造交汇区东侧(通南巴区块),形成NNW、NW及近EW向节理,并发育一系列北西向的褶皱和断裂,如马路背和黑池梁背斜被大量北西向背斜所切割等;龙门山构造带扩展影响构造交汇区西侧(九龙山北斜及南缘一带),对早期北东向背斜进行了强化改造;构造交汇区的中部(元坝区块中部),为SW向应力场与SE向应力场叠加干涉,发育近SN向断裂.

通过以上分析,川北构造交汇区主要受到两期构造活动的影响:燕山晚期由于来自米仓山的挤压,形成研究区内北东向构造主体,喜山期大巴山活动范围向南西方向继续扩展以及龙门山向南东方向挤压,对研究区施加复杂干涉叠加构造作用力,导致川北构造交汇区的形成.最终致使目的层段形成现今的构造特征.

4 构造交汇区应力场演化

研究区主要受三个方向构造应力场的作用:Ⅰ最大主应力方向为SE-NW(132°);Ⅱ最大主应力方向为NE-SW(244°);Ⅲ最大主应力方向为近SN(10°).其中褶皱、节理、擦痕所体现的SE-NW和

NE-SW的最大主应力主要发育四川盆地内部,而近SN向最大主应力主要发育于米仓山 J_2 及其更老的岩层中,结合前面地质分析认为,SN向作用力形成燕山早期,主要影响至大两会背斜及其以北的区域,主要形成米仓山内部近EW向构造,并未波及到嘉川-南江以南的盆内区域.总体上来说,通南巴-元坝区块燕山早期未发生构造变动(图6).燕山晚期主要受到川东构造带和米仓山构造带共同的影响.该时期江南-雪峰构造活动影响范围扩展到米仓山前缘,而米仓山构造活动继续向盆内扩展,在两种构造活动的联合控制下,最大主应力方向发生偏转,由早期近SN向构造作用力偏转为NW-SE向,所形成的SE-NW向构造应力,造就了米仓山前缘NE向的构造格局,其中研究区九龙山背斜、通南巴背斜以及通江向斜均是在该背景下所形成的(图7).喜山期,江南-雪峰构造域和米仓山构造带开始逐渐趋于平静,构造活动对通南巴-元坝的影响开始减弱.而大巴山此时开始重新活动,继承性的由NE向SW扩展(沈传波等,2007).与此同时,西侧印度板块快速俯冲,致使青藏大幅度隆升,龙门山在此背景下开始向四川盆地推覆.在北东侧大巴山、西北侧龙门山联合控制下构造交汇区内形成应力场干涉,产生的应力场呈弧形特点:交汇区西侧以龙门山向南东扩展的应力场为主,交汇区中部以龙门山向南东、大巴山向南西干涉偏转应力场为主,而交汇区东侧以大巴山向南西扩展的应

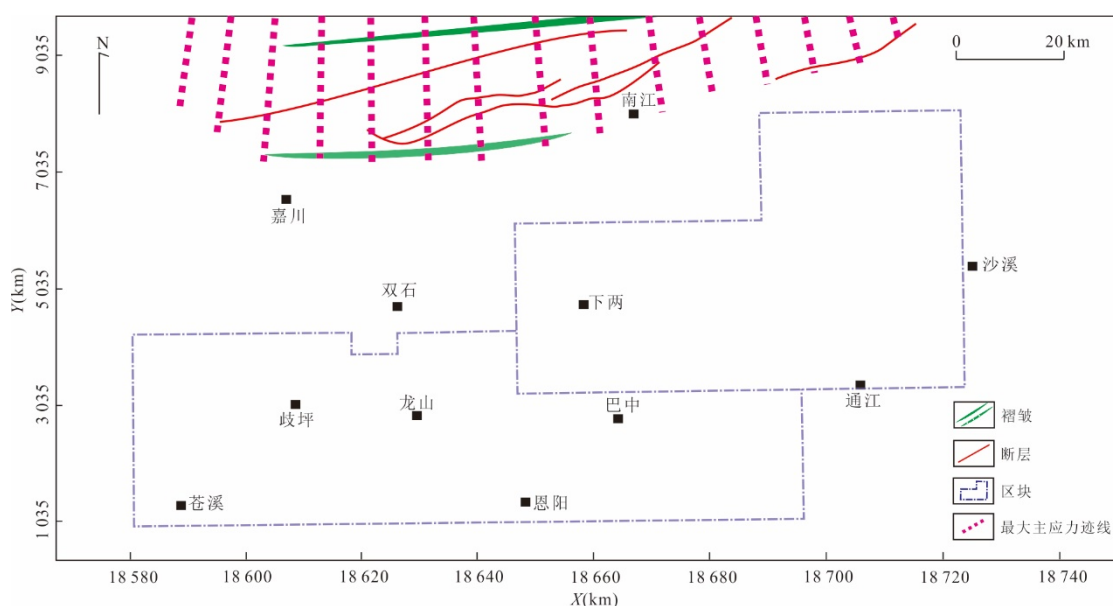


图6 构造交汇区燕山早期应力迹线

Fig.6 Stress trace of the early Yanshanian period in the structural intersection area

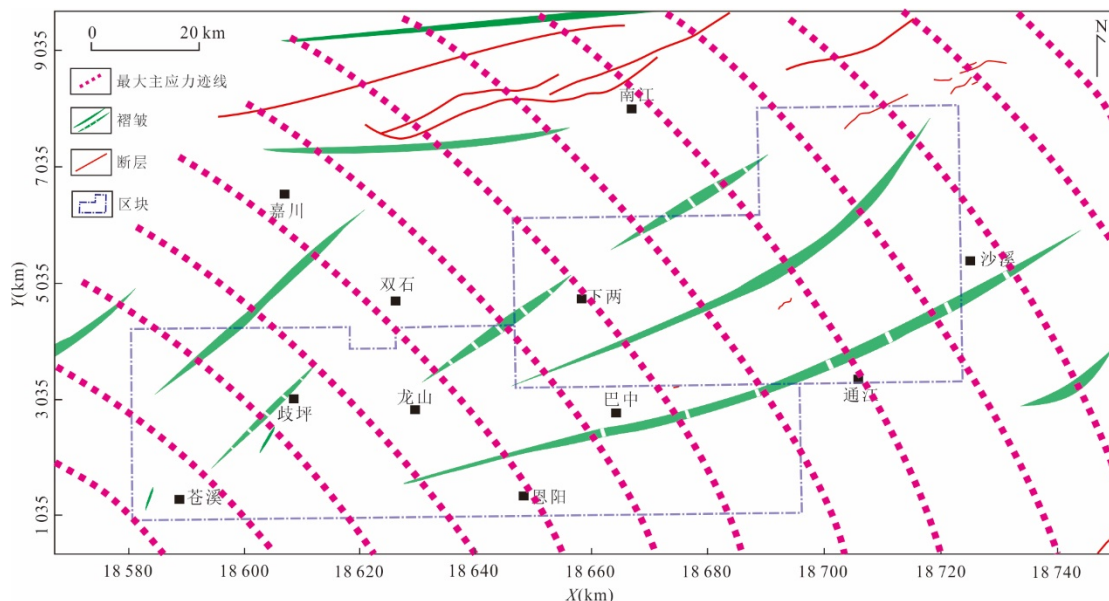


图 7 构造交汇区燕山晚期应力迹线

Fig.7 Stress trace of the late Yanshanian period in the structural intersection area

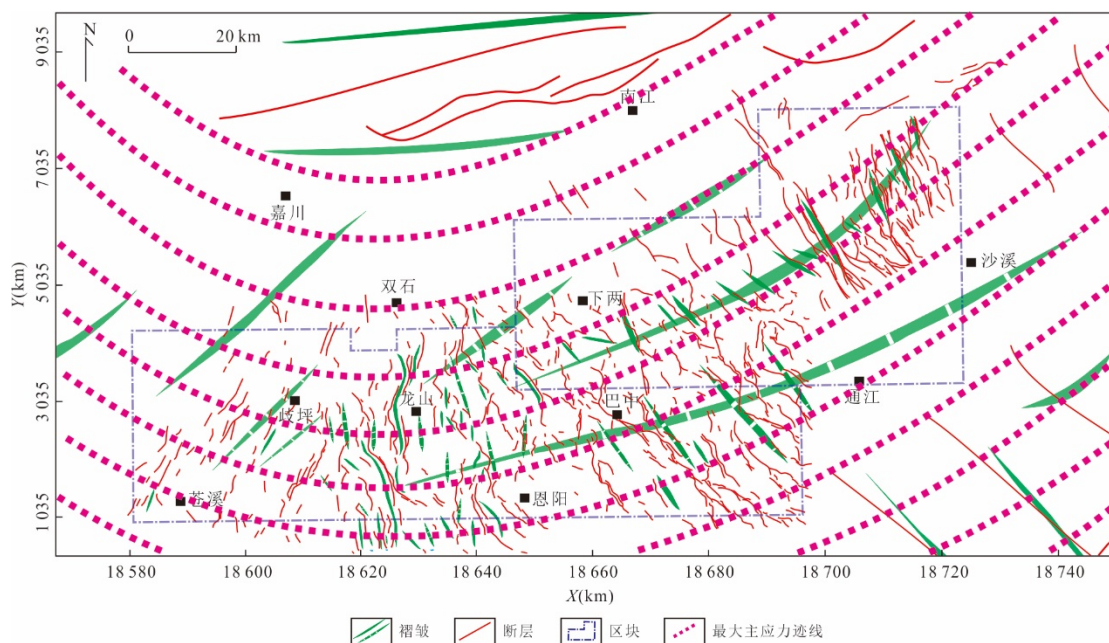


图 8 构造交汇区喜山期应力迹线

Fig.8 Stress trace of the Himalayan period in the structural intersection area

力场为主.进而形成至西向东:NE向断裂→NS向断裂→NW向断裂逐渐偏转的断裂系统(图8).

5 构造交汇区须家河组裂缝发育特征

5.1 元坝地区须家河组燕山晚期裂缝特征

燕山晚期,南秦岭由北而南的强烈挤压作

用,元坝地区形成近NE向背斜,并且发育一组共轭剪切节理,该期节理与岩层面高角度相交,节理方位主要为NW和近SN向,该期裂缝充填物形成时间最早,充填程度高,充填物主要为次生方解石.裂缝在构造挤压作用下扩展贯穿,最终形成NW、近SN节理体系.

燕山晚期褶皱控缝:燕山晚期形成的NE向背斜控制裂缝分布:褶皱端部要比褶皱翼部要发育,

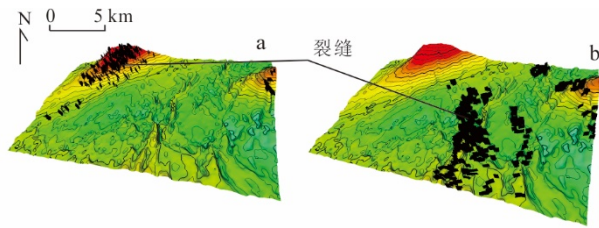


图9 元坝地区须家河组裂缝随机模拟
Fig.9 Stochastic simulation of fractures in Xujiache Formation of Yuanba block

a.燕山晚期裂缝; b.喜山期裂缝

切穿层的规模要大,连通程度也要高(图9a).这也为裂缝随机模拟提供了思路.研究是基于构造应力确定范围(目标)的离散裂缝网络模型,把裂缝视为具有几何属性(位置、大小、范围、开度)的标点,通过随机模拟的方法实现从裂缝描述到裂缝分布的随机模拟.模拟过程中,利用裂缝长度、开度以及方位统计分布建立裂缝数据库,然后在数据库中随机选取裂缝来形成网络.由于可以获得密度分布图,产生一条裂缝,该条裂缝穿过的所有网格的裂缝密度都实行更新,这就导致一组新的裂缝密度,模拟过程一直进行直到每个网格的裂缝密度与原始裂缝密度相吻合为止.九龙山背斜转折端裂缝密度可达3.98条/m,褶皱翼部(相当于平缓区域)裂缝密度为0.8条/m;转折端裂缝切层深度可达3 m,而平缓区域仅为0.27 m(主要有野外测量获得,一般终止于泥岩层);转折端延伸长度可达7.2 m,平缓区域延伸长度均在2 m以内;裂缝之间的连通程度显示褶皱转折端相较于平缓区域强(图10a).

5.2 元坝地区须家河组喜山期裂缝特征

部分近SN向、NEE向节理是喜山期大巴山构造活动所形成.喜马拉雅构造运动早期,元坝地区受到大巴山逆冲推覆带的NE-SW向水平构造挤压,该期构造运动的影响下,须家河组中发育近SN向、NEE向共轭剪切节理,该组节理与须家河组高角度相交,与成像测井观测统计的近SN向和NEE向节理基本一致.该期裂缝中的近SN向裂缝连通,贯穿早期近SN向裂缝,并进一步扩展,形成近SN向断裂体系.

通过野外统计、成像测井数据分析,燕山早期所形成的裂缝主要受到局部小构造的限制和影响,例如褶皱的发育.喜山期断裂控缝:喜山期的SN向断层控缝多条断层控制的裂缝要比单条断层控制的裂缝发育,切穿层的规模要大,连通程度也要高

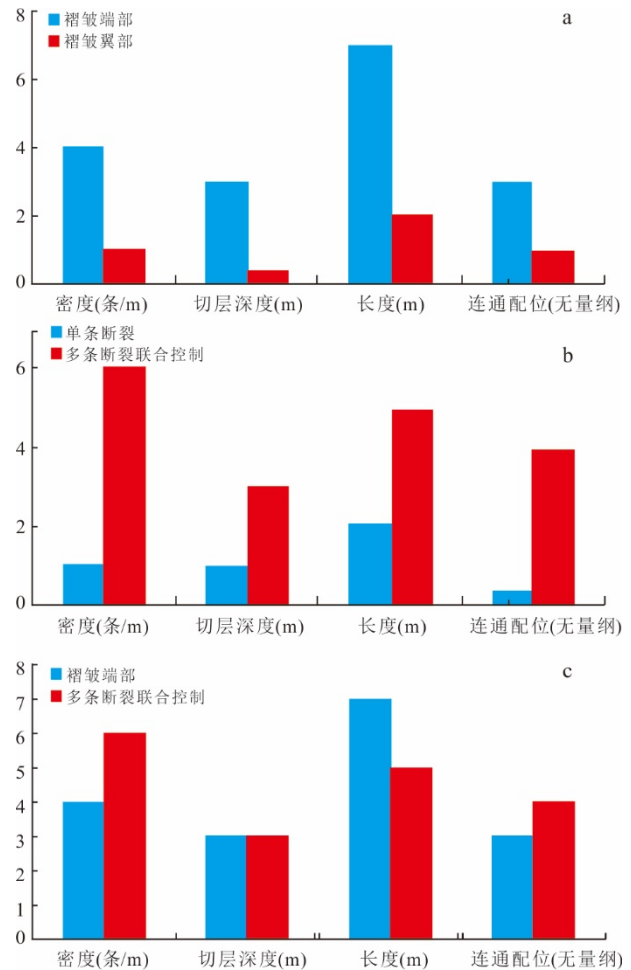


图10 元坝地区须家河组构造控缝分析

Fig.10 Structural control of fractures in Xujiache Formation of Yuanba block

a.燕山晚期构造控缝;b.喜山期构造控缝;c.燕山晚期与喜山期构造控缝对比

(图9b).该时期多条断层联合控制区域较单条裂缝控制区域裂缝发育程度高,多条裂缝联合控制区裂缝密度可达6条/m,而单条裂缝控制区裂缝密度仅为1条/m;多条裂缝联合控制区裂缝切层深度达3 m,而单条裂缝控制区裂缝密度仅为1 m;多条裂缝联合控制区裂缝延伸长度可达5 m(主要受到主干断裂的控制),单条裂缝控制区裂缝延伸长度仅为1.92 m;多条裂缝联合控制区一条裂缝可能与周围4条裂缝均有交切关系,单条裂缝控制区一条裂缝可能与周围一条裂缝发交切连通,或者单条裂缝发育不与周缘裂缝交切(图10b).

分析燕山晚期、喜山期裂缝后,对元坝区域内裂缝进行了对比研究,明确两期构造对裂缝控制由一定的差异.裂缝控制因素对比:(1)多条断层控制的裂缝比褶皱端部控制的裂缝发育,切层规模大,

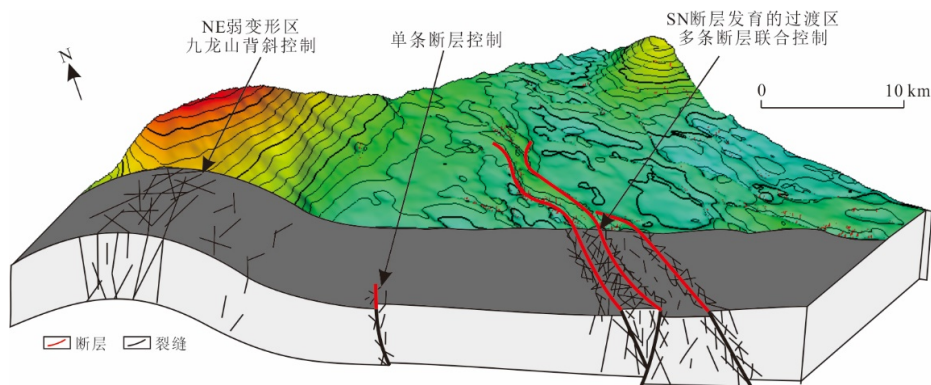


图 11 元坝地区裂缝发育模式
Fig.11 Fracture development model in Yuanba block

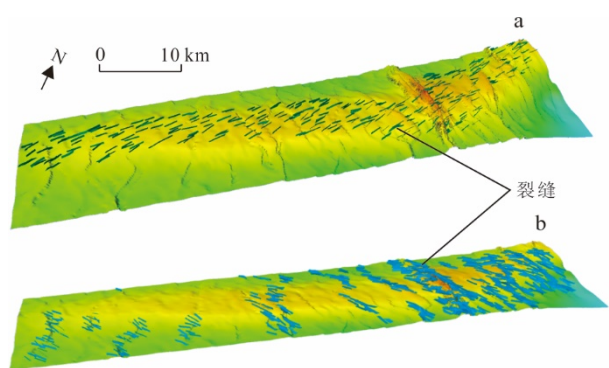


图 12 通南巴须家河组裂缝随机模拟
Fig.12 Stochastic simulation in Xujiahe Formation of Tongnanba block
a. 燕山晚期裂缝; b. 喜山期裂缝

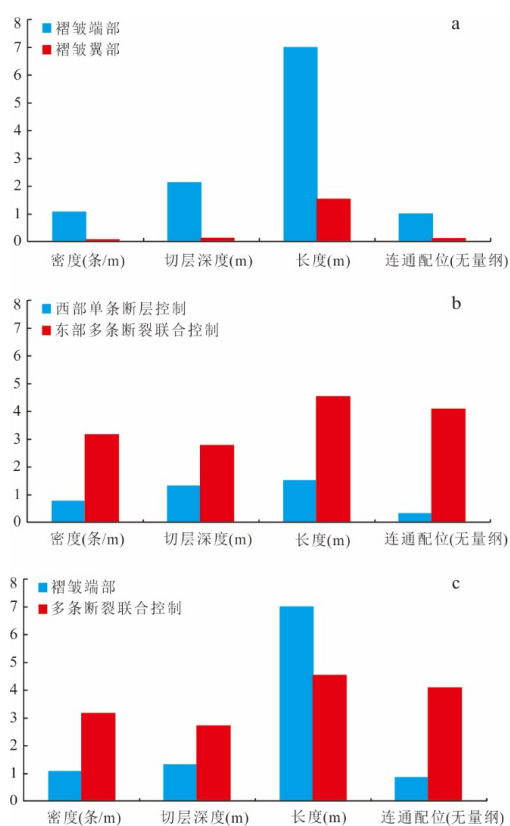


图 13 通南巴地区须家河组构造控缝分析
Fig.13 Structural control of fractures in Xujiahe Formation of Tongnanba block
a. 燕山晚期构造控缝; b. 喜山期构造控缝; c. 燕山晚期与喜山期构造控缝对比

连通程度高;(2)喜山期构造形成的裂缝比燕山晚期规模大,对油气改造程度高;(3)燕山期裂缝以改善储层物性为主;(4)喜山期裂缝以疏导油气和改善储层为主(图 10c).并在此基础上建立了元坝区域裂缝发育模式,元坝西侧以九龙山背斜控制的褶皱控缝为主因,元坝中部则以断裂控缝为主因(图 11).

5.3 通南巴地区须家河组燕山晚期裂缝特征

通南巴以近水平的低角度构造缝,其延伸距离较小,排布较为密集,具有等距分布的特点,其成因与构造挤压作用下断层的逆冲作用或层间滑动造成的近水平剪切作用有关.成像测井显示通南巴高导缝的倾角在 $40^{\circ}\sim 80^{\circ}$,即主要为中-高角度裂缝,走向的主要方位为近 SN 向、NWW 向以及少量 NE 向,裂缝走向与临近高角度逆断层的走向平行.未充填裂缝形成于强烈构造活动期的构造缝为主,受周边断层、局部褶皱的控制,绝大多数高角度构造裂缝发育在砂岩中.通南巴须家河组发育多组不同形式的裂缝,裂缝之间存在明显的交切关系.

燕山晚期,通南巴持续遭受 NW 向构造挤压,形成主体 NE 向通南巴背斜及少量 NE 向断层,裂缝以发育于褶皱枢纽的张性裂缝及断层伴生裂缝为主,走向为 NE 及 NW 向,多被粗粒方解石或石英充填.依据研究区内成像测井所获得裂缝数据,运用随机模拟思想,获得了通南巴地区燕山晚期裂缝在三维空间的

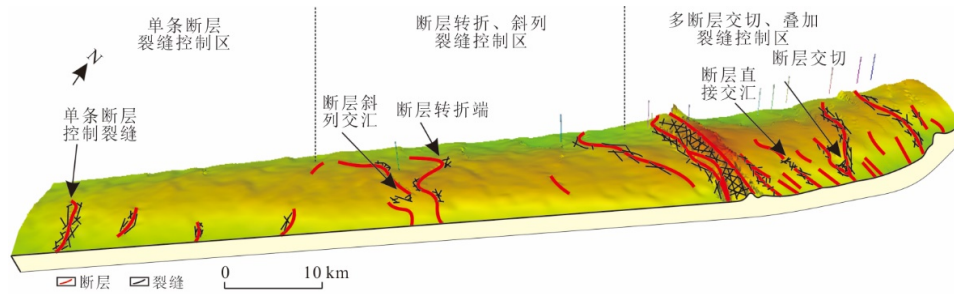


图 14 通南巴须家河组裂缝发育模式

Fig.14 Fracture development model of Xujiache Formation in Tongnanba block

分布状态,整个裂缝呈NEE、NE向展布(图 12a)。

经过模拟计算、野外实测,发现通南巴地区须家河组裂缝受构造控制明显.燕山晚期主要由NE向褶皱控制裂缝分布:褶皱端部要比褶皱翼部要发育,切穿层的规模要大,连通程度也要高.其中褶皱端部裂缝密度可达1.08条/m,裂缝切层深度为2.17 m,延伸长度大约为6.82 m,连通程度为0.94,翼部裂缝密度仅为0.1条/m,裂缝切层深度为0.21 m,延伸长度大约为1.3 m,连通程度为0.106.整体上裂缝发育相对较为均一.只是在背斜拐弯区域裂缝发育密度相对较高些,但整体上裂缝发育程度较低(图 13a)。

5.4 通南巴地区须家河组喜山期裂缝特征

喜马拉雅运动期(古近纪),大巴山逆冲推覆构造活动强烈,通南巴受到构造应力方向由NW转向NE,形成大量NW及近SN向高角度逆断层,局部NW向小褶皱叠加在前期NE向宽缓褶皱之上,该时期发育NW和近SN向断层伴生裂缝,其规模和数量远大于燕山期裂缝,少量裂缝被方解石半充填;新近纪以来,大巴山挤压作用持续增强,以形成为充填高角度构造缝为主,伴随部分低角度顺层滑脱裂缝,NE向构造应力对前期NW和NE向断裂体系持续改造叠加,最终形成NW、NE向复合断裂体系。

喜山期裂缝发育强度最高的区域位于通南巴构造的NE端,裂缝密度3.16条/m,裂缝切层深度为2.75 m,延伸长度可达4.63 m,裂缝连通配位数为4.1.强度最低的区域位于通南巴构造的SW端,裂缝密度0.64条/m,裂缝切层深度为1.3 m,延伸长度可达1.45 m,裂缝连通配位数为0.26(图 13b).说明越靠近力源岩石破裂程度越高,远离力源岩石破裂程度越低.说明大巴山构造活动对通南巴后期裂缝发育影响程度较元坝要高。

自西向东,裂缝发育程度越来越高,控制裂缝的断层由形态简单的单条断层逐渐向由形态

复杂单条断层控制、复杂的多条断层控制.靠近元坝区域主要由单条断层控制裂缝发育,主要发育断邻破类型的裂缝;往东靠近通南巴中部,主要由断层的弯曲、转折,以及断层的斜列来控制裂缝的发育,该区域裂缝主要发育于裂缝转折端和两条斜列裂缝尖灭过渡的区域;通南巴东部则主要发育距离较近断层联合控制,局部可见交切断层的交汇部位裂缝发育程度高(图 13c).总体上依据裂缝发育程度可将通南巴区块裂缝发育形式建立三种不同的模式:简单、过渡、复杂。

裂缝控制因素对比:形态复杂的多条断层控制的裂缝比形态简单单条断层控制的裂缝发育,切层规模大,连通程度高.喜山期构造发育的裂缝比燕山晚期规模大,强度高,对油气改造程度高;燕山期裂缝以改善储层物性为主;喜山期裂缝以疏导油气和改善储层为主.褶皱端部单条裂缝发育规模较断层所控制单条裂缝发育规模要大,但裂缝所发育密度、联通程度则比褶皱端部所发育的裂缝要强(图 14)。

6 结论

(1)元坝-通南巴区块交汇构造格局主要是喜山期向南凸出的弧形应力场作用来控制.燕山晚期受到近SE向挤压应力场,奠定了形成NE向宽缓构造应力背景.喜山期受到东侧大巴山SW向挤压作用,西侧龙门山向SE向挤压作用,在元坝-通南巴区形成干涉效应,形成向南凸出的弧形应力场,控制了整个元坝、通南巴区块构造迹线由NE逐渐向NW偏转的转化:元坝西部受龙门山SE向应力远程改造效应的影响,形成NE向断裂,由于挤压作用较弱,NE向断层发育的范围较小;元坝中部受龙门山远程效应和大巴山远程效应的联合控制,形成近SN向断裂;通南巴受大巴山向四川盆地扩展的影响,形成一系列NW向断裂改造早期所形成NE向

通南巴背斜.喜山期对早期NE向构造的改造由西至东是逐渐变化的:西侧(元坝区块西侧)表现为继承性NE向构造发展,中部(元坝区块中部)呈现为SN切割改造NE向构造,西侧(通南巴区块)为NW向构造切割调整NE向构造,表明喜山期受到向南突出的不均匀应力作用调整改造早期构造.

(2)不同构造时期构造交汇区的应力呈现不同的状态,且对裂缝的控制也存在差异:燕山晚期形成的NE向背斜控制裂缝分布,喜山期断裂控制.喜山期弧形应力场影响裂缝发育,自西向东裂缝发育程度越来越高,控制裂缝的断层由形态简单的单条断层逐渐向由形态复杂单条断层控制、复杂的多条断层控制.靠近构造交汇区西部主要由单条断层控制裂缝发育;往东靠近构造交汇区中部,主要由断层的弯曲、转折,以及断层的斜列来控制裂缝的发育;构造交汇区东部则主要发育距离较近断层联合控制,局部可见交切断层的交汇部位裂缝发育程度高.

致谢:本文野外数据采集受到中石化无锡石油地质所罗开平教授、杨帆高级工程师的帮助,成文过程受到中国地质大学(武汉)梅廉夫教授的指导,在此致以衷心感谢!

References

- Cao, H. Y., Wang, W., Liu, M., 2018. Characteristics of Fractures in Xujiahe Formation of Tongnanba Structural Belt, Northeastern Sichuan Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 39(4): 424–429 (in Chinese with English abstract).
- Chen, L. B., He, D. F., Wang, B., et al., 2017. Dating the Tectonic Deformation since the Middle Triassic for the Tongnanba Anticline in the Northeastern Sichuan Basin and Its Geological Implications. *Geotectonica et Metallogenia*, 41(3): 433–445 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, S. Y., Zhang, G. W., 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).
- Deng, B., 2013. Meso-Cenozoic Architecture of Basin-Mountain System in the Sichuan Basin and Its Gas Distribution (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu (in Chinese with English abstract).
- Deng, B., Shigeru, S., Liu, S. G., et al., 2014. Wedge-Thrust Folding in the Micangshan Constrained by Low-Temperature Thermochronometer Model and Its Significance. *Chinese Journal of Geophysics*, 57(4): 1155–1168 (in Chinese with English abstract).
- Fan, C. H., Qin, Q. R., Li, H., et al., 2017. Formation Stages of Structural Fractures of Xujiahe Formation in the Fault-Fold Belt of Central Yuanba Area, Sichuan Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 38(10): 1135–1143 (in Chinese with English abstract).
- Fan, J. Y., Qin, Q. R., Su, P. D., 2009. Fracture Genesis in Tongnanba Structural Belt. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 16(1): 38–41, 107 (in Chinese with English abstract).
- Gao, Z. Y., Bai, B., Zhu, R. K., et al., 2012. Reservoir Sedimentary Response to Tectonic Movement of the Late Triassic in Front of Dabashan and Longmen Mountains. *Journal of Palaeogeography*, 14(6): 801–812 (in Chinese with English abstract).
- Guo, T. L., 2013. Key Controls on Accumulation and High Production of Large Non-Marine Gas Fields in Northern Sichuan Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 40(2): 139–149 (in Chinese with English abstract).
- Jia, D., Chen, Z. X., Jia, C. Z., et al., 2003. Structural Features of the Longmen Shan Fold and Thrust Belt and Development of the Western Sichuan Foreland Basin, Central China. *Geological Journal of China Universities*, 9(3): 402–410 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, Y. L., Li, M. Y., Wang, L. J., et al., 2020. Characteristics and Controlling Factors of Tight Sandstone Reservoir Fractures of the Xujiahe Formation in the Bazhong-Tongnanba Area, Northeast Sichuan. *Acta Geologica Sinica*, 94(5): 1525–1537 (in Chinese with English abstract).
- Lei, Y. L., Jia, C. Z., Li, B. L., et al., 2012. Meso-Cenozoic Tectonic Events Recorded by Apatite Fission Track in the Northern Longmen-Micang Mountains Region. *Acta Geologica Sinica - English Edition*, 86(1): 153–165. <https://doi.org/10.1111/j.1755-6724.2012.00618.x>
- Li, H., Fan, C. H., Qin, Q. R., et al., 2018. Fracture Characteristics and Its Genesis of Tight Reservoir in Xujiahe Formation of Central Yuanba Area in Sichuan Basin. *Reservoir Evaluation and Development*, 8(2): 1–6 (in Chinese with English abstract).
- Liu, S. G., Deng, B., Li, Z. W., 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).
- Liu, S. G., Luo, Z. L., Zhao, X. K., et al., 2003. Coupling Relationships of Sedimentary Basin-Orogenic Belt Systems and Their Dynamic Models in West China—A

- Case Study of the Longmenshan Orogenic Belt-West Sichuan Foreland Basin System. *Acta Geologica Sinica*, 77(2): 177–186 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z. Q., Luo, K. P., Tang, Y., et al., 2019. Critical Tectonic Periods and the Response of Gas Accumulation in Non-Marine Tight Sandstone Reservoir in Yuanba-Tongnanba Area, Sichuan Basin. *Earth Science*, 44(3): 756–772 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z. Q., Mei, L. F., Guo, T. L., et al., 2009. Characteristics and Differences of Hydrocarbon Accumulations in Marine Carbonate Rocks, Northeast Sichuan Basin: A Case Study from Puguang and Maoba Gas Fields. *Petroleum Exploration and Development*, 36(5): 552–561 (in Chinese with English abstract).
- Luo, L., Qi, J. F., Zhang, M. Z., 2015. Difference Study on Evolution and Deformation of the Fold-Thrust Belts Surrounding Sichuan Basin. *Geological Review*, 61(3): 525–535 (in Chinese with English abstract).
- Ma, D. L., Wang, H. B., Zhang, X. C., et al., 2023. Analogue Modeling of Structural Deformation of Tongnanba Anticline in Mesozoic and Cenozoic, NE Sichuan Basin. *Earth Science*, 48(4): 1307–1320 (in Chinese with English abstract).
- Pei, X. Z., Li, R. B., Ding, S. P., et al., 2009. Tectonic Intersection Relationship between Dabashan and Micangshan in Zhenba Area, Southern Shaanxi Province. *Oil & Gas Geology*, 30(5): 576–583 (in Chinese with English abstract).
- Qin, Q. R., Zhu, M. Y., Fan, C. H., et al., 2017. Structural Features Analysis and Genetic Mechanism of Xujiache Formation in the Center of Yuanba Area, Sichuan Basin. *Reservoir Evaluation and Development*, 7(2): 1–6 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, N. S., Qin, J. Z., McInnes, B., et al., 2008. Tectonothermal 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).
- Shen, C. B., Mei, L. F., Guo, T. L., 2007. Fission Track Analysis of Mesozoic-Cenozoic Thermal History in Northeast Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 27(7): 24–26, 131–132 (in Chinese with English abstract).
- Shi, W., Dong, S. W., Hu, J. M., et al., 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).
- Song, Q. W., Yan, D. P., Jiao, S. T., et al., 2014. The Response of Compounding Process of Dabashan and Xuefengshan Thrust Belt in J₃-K₁: The Structural Styles and Formation Mechanism of the Zigui Fold Belt, Western Hubei. *Acta Geologica Sinica*, 88(8): 1382–1400 (in Chinese with English abstract).
- Tang, Y., Liu, H. Q., Li, Q. H., et al., 2015. Analysis of Tectonic Stress Field and Potential Activities in Lingshan Fault Zone, Guangxi. *Geotectonica et Metallogenia*, 39(1): 62–75 (in Chinese with English abstract).
- Wang, W., Fan, R., 2019. Characteristics of Xujiache Formation Fault-Fracture Reservoirs in the Northern Sichuan Basin and Its Exploration Significance. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 46(5): 541–548 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. J., Yang, Z. R., Han, B., 2015. Superposed Evolution of Sichuan Basin and Its Petroleum Accumulation. *Earth Science Frontiers*, 22(3): 161–173 (in Chinese with English abstract).
- Wen, K., Li, C. X., 2020. The Geometry and Kinematics of the Intersection Area of Eastern Sichuan and the Dabashan Fold-Thrust Belt. *Acta Geologica Sinica*, 94(2): 426–438 (in Chinese with English abstract).
- Wu, S. X., Tang, L. J., Guo, T. L., et al., 2005. Structural Zonation and Oil/Gas Distribution in Intersecting Area of Micang and Daba Mountains. *Oil & Gas Geology*, 26(3): 361–365, 390 (in Chinese with English abstract).
- Xu, C. H., Zhou, Z. Y., Chang, Y., et al., 2010. Genesis of Daba Arcuate Structural Belt Related to Adjacent Basement Uplifts: Constraints from Fission-Track and (U-Th)/He Thermochronology. *Science China Earth Sciences*, 53(11): 1634–1646 (in Chinese).
- Yang, S., Wang, W., Zhang, L., et al., 2020. Control Factors and Distribution of Chlorite-Cemented Facies in the Xujiache Sandstone, Yuanba and Tongnanba Area. *Earth Science*, 45(2): 479–488 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, C., Zhou, W., Xie, R. C., et al., 2015. Fracture Prediction in the Fault Belt of Xu Member 4 in Yuanba Gasfield. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 34(1): 11–17 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. W., Guo, A. L., Yao, A. P., 2004. Western Qinling-Songpan Continental Tectonic Node in China's Continental Tectonics. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 23–32 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. N., 2015. Study of Tectonic Thermal Evolution

History and Uplift in Mesozoic-Cenozoic in the North Rim of Sichuan Basin (Dissertation). Chang'an University, Xi'an (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 曹环宇, 王威, 刘明, 2018. 川东北通南巴构造带须家河组裂缝特征. 新疆石油地质, 39(4): 424-429.
- 陈龙博, 何登发, 王贝, 等, 2017. 川东北地区通南巴背斜中三叠世以来构造变形时间厘定及其地质意义. 大地构造与成矿学, 41(3): 433-445.
- 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.
- 邓宾, 2013. 四川盆地中-新生代盆-山结构与油气分布(博士学位论文). 成都: 成都理工大学.
- 邓宾, Shigeru, S., 刘树根, 等, 2014. 米仓山楔入冲断构造模型低温热年代学证据及其意义. 地球物理学报, 57(4): 1155-1168.
- 范存辉, 秦启荣, 李虎, 等, 2017. 四川盆地元坝中部断褶带须家河组储层构造裂缝形成期次. 石油学报, 38(10): 1135-1143.
- 樊靖宇, 秦启荣, 苏培东, 2009. 通南巴构造带裂缝成因研究. 特种油气藏, 16(1): 38-41, 107.
- 高志勇, 白斌, 朱如凯, 等, 2012. 大巴山与龙门山前晚三叠世构造运动的储集层沉积学响应. 古地理学报, 14(6): 801-812.
- 郭彤楼, 2013. 四川盆地北部陆相大气田形成与高产主控因素. 石油勘探与开发, 40(2): 139-149.
- 贾东, 陈竹新, 贾承造, 等, 2003. 龙门山前陆褶皱冲断带构造解析与川西前陆盆地的发育. 高校地质学报, 9(3): 402-410.
- 蒋有录, 李明阳, 王良军, 等, 2020. 川东北巴中-通南巴地区须家河组致密砂岩储层裂缝发育特征及控制因素. 地质学报, 94(5): 1525-1537.
- 李虎, 范存辉, 秦启荣, 等, 2018. 川东北元坝中部地区须家河组致密储层裂缝特征及成因探讨. 油气藏评价与开发, 8(2): 1-6.
- 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.
- 刘树根, 罗志立, 赵锡奎, 等, 2003. 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.
- 刘昭茜, 罗开平, 唐永, 等, 2019. 四川盆地元坝-通南巴地区关键构造期构造特征及陆相致密砂岩天然气成藏响应. 地球科学, 44(3): 756-772.
- 刘昭茜, 梅廉夫, 郭彤楼, 等, 2009. 川东北地区海相碳酸盐岩油气成藏作用及其差异性: 以普光、毛坝气藏为例. 石油勘探与开发, 36(5): 552-561.
- 罗良, 漆家福, 张明正, 2015. 四川盆地周缘冲断带构造演化及变形差异性研究. 地质论评, 61(3): 525-535.
- 马德龙, 王宏斌, 张希晨, 等, 2023. 川东北通南巴背斜中新生代构造变形的砂箱构造物理模拟. 地球科学, 48(4): 1307-1320.
- 裴先治, 李瑞保, 丁仁平, 等, 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): 576-583.
- 秦启荣, 朱梦月, 范存辉, 等, 2017. 四川盆地元坝中部须家河组构造形迹解析及成因机制. 油气藏评价与开发, 7(2): 1-6.
- 邱楠生, 秦建中, Brent I A McInnes, 等, 2008. 川东北地区构造-热演化探讨: 来自(U-Th)/He年龄和Ro的约束. 高校地质学报, 14(2): 223-230.
- 沈传波, 梅廉夫, 郭彤楼, 2007. 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, 131-132.
- 施炜, 董树文, 胡健民, 等, 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.
- 宋庆伟, 颜丹平, 焦守涛, 等, 2014. 大巴山与雪峰山逆冲构造带J₃-K₁复合过程的响应: 鄂西秭归褶皱带构造样式与形成机制. 地质学报, 88(8): 1382-1400.
- 唐永, 刘怀庆, 黎清华, 等, 2015. 广西灵山断裂带构造应力场地质分析及活动性预测. 大地构造与成矿学, 39(1): 62-75.
- 王威, 凡睿, 2019. 四川盆地北部须家河组“断缝体”气藏特征及勘探意义. 成都理工大学学报(自然科学版), 46(5): 541-548.
- 王学军, 杨志如, 韩冰, 2015. 四川盆地叠合演化与油气聚集. 地学前缘, 22(3): 161-173.
- 文凯, 李传新, 2020. 川东与大巴山褶皱冲断带交汇区构造几何学和运动学特征. 地质学报, 94(2): 426-438.
- 吴世祥, 汤良杰, 郭彤楼, 等, 2005. 米仓山与大巴山交汇区构造分区与油气分布. 石油与天然气地质, 26(3): 361-365, 390.
- 许长海, 周祖翼, 常远, 等, 2010. 大巴山弧形构造带形成与两侧隆起的关系: FT和(U-Th)/He低温热年代约束. 中国科学: 地球科学, 40(12): 1684-1696.
- 杨烁, 王威, 张莉, 等, 2020. 元坝-通南巴地区须家河组绿泥石膜胶结相砂岩发育控制因素与分布规律. 地球科学, 45(2): 479-488.
- 张冲, 周文, 谢润成, 等, 2015. 元坝气田须四段断裂带裂缝预测. 大庆石油地质与开发, 34(1): 11-17.
- 张国伟, 郭安林, 姚安平, 2004. 中国大陆构造中的西秦岭-松潘大陆构造结. 地学前缘, 11(3): 23-32.
- 张艳妮, 2015. 四川盆地北缘构造热演化史与中-新生代隆升研究(硕士学位论文). 西安: 长安大学.