

# 川西坳陷彭州地区雷口坡组天然裂缝发育特征与形成期次

夏宇<sup>1</sup>, 邓虎成<sup>1,2</sup>, 王园园<sup>1</sup>, 何建华<sup>1</sup>, 解馨慧<sup>1</sup>, 滕娟<sup>1</sup>

1 成都理工大学能源学院; 2 成都理工大学产业技术学院

**摘要** 利用野外露头、岩心、薄片及地球化学等资料对四川盆地川西坳陷彭州地区雷口坡组天然裂缝发育特征及形成期次开展了研究。研究区宏观裂缝按成因可划分构造裂缝和非构造裂缝,构造裂缝包括张性裂缝、剪性裂缝和破碎状裂缝,非构造裂缝主要为风化网状裂缝。宏观裂缝以构造裂缝为主,主要为剪性裂缝和张性裂缝,其中的垂直裂缝、高角度裂缝的发育密度和有效性较高。微裂缝充填程度高,有效性较差,对储层的影响较小。研究区雷口坡组主要发育4期构造裂缝和1期风化裂缝,构造裂缝形成于印支中—晚期、燕山早—中期、燕山晚期和喜马拉雅期,风化裂缝发育在印支早期。印支期裂缝在燕山中晚期烃源岩大规模排烃之前已被方解石、石膏等充填,对油气开发高产的意义不大;燕山中晚期—喜马拉雅期形成的垂直裂缝和高角度裂缝对彭州地区雷口坡组气藏开发具有重要意义。这项研究为进一步综合评价研究区储层特征、明确天然气富集规律提供了依据。

**关键词** 裂缝特征; 裂缝期次; 雷口坡组; 彭州地区; 四川盆地

**中图分类号**: TE122.2 **文献标识码**: A

## 0 前言

经过近50年的勘探,在四川盆地中三叠统雷口坡组先后发现了川中磨溪、川西中坝等大中型气藏和含气构造。“古隆起+古岩溶”作用控制下的雷口坡组具有形成大型油气聚集带的优越条件<sup>[1-3]</sup>。近年来,在川西坳陷中段的彭州地区实施的CK1井、XS1井、PZ1井测试分别获气 $86.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 、 $68 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 、 $121 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,显示出川西地区雷口坡组良好的油气勘探潜力<sup>[4-5]</sup>。雷口坡组天然气富集条件复杂、储层类型多样,储层中天然裂缝发育,但裂缝对储层的贡献及有效性比较复杂,裂缝特征、形成期次和有效性已成为勘探研究亟需解决的问题之一。例如,CK1井风化壳气藏位于裂缝发育带内,日产气量稳定在 $10.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 左右;但裂缝较发育的DS1井测试时产气量较低,岩心观察发现DS1井的低角度裂缝和风化裂缝较多,裂缝有效性较差。赵向原等<sup>[6]</sup>认为彭州气田雷口坡组储层裂缝以构造缝为主,剪性缝居多,裂缝有效性较高;高角度缝与构造应力有关,与孔隙度

相关性较好。罗啸泉等<sup>[7]</sup>认为川西地区裂缝对油气运聚的影响较大,改善了储集物性,可作为良好的油气运移通道。杨长清等<sup>[8]</sup>、李耀华等<sup>[9]</sup>认为中生代以来川西坳陷印支期、燕山期和喜马拉雅期的构造演化控制了油气藏的发育与分布。

笔者利用彭州地区雷口坡组9口取心井的岩心(462 m)、薄片(73片)、碳氧同位素组成数据(54项)和声发射测试数据(8项)等资料,对天然裂缝特征和形成期次进行研究,认为雷口坡组裂缝以剪性裂缝和张性裂缝为主,发育4期构造成因裂缝和1期风化成因裂缝,其中燕山中晚期—喜马拉雅期的垂直裂缝和高角度裂缝有效性较高。这项研究可为雷口坡组储层综合评价、天然气富集规律研究提供依据。

## 1 地质概况

川西坳陷处于四川盆地西部,呈北东向展布(图1a)。受西侧龙门山推覆构造带影响,川西坳陷发育一系列NE走向的构造和断裂;三叠纪后经历了印支运动、燕山运动和喜马拉雅运动等大规模构造运动。

收稿日期: 2020-03-09; 改回日期: 2020-10-30; 网络出版日期: 2021-02-24

本文受四川省教育厅省属高校科研创新团队“非常规油气地质研究”(编号:14TD0008)资助

**第一作者**: 夏宇, 硕士在读, 研究领域为非常规油气地质学。通信地址: 610059 四川省成都市成华区成都理工大学能源学院; E-mail: 447905450@qq.com

造运动,形成了多期次、多成因叠加的断裂体系<sup>[7]</sup>。彭州地区位于川西坳陷中部,雷口坡组发育石羊镇—金马—鸭子河构造,其主体为夹于关口断裂带与彭县断裂带之间、呈北东向展布的大型正向构造<sup>[6]</sup>。

研究区雷口坡组海相地层具有良好的天然气资源潜力<sup>[10-11]</sup>。雷口坡组上覆马鞍塘组、下伏嘉陵江组,自下而上分为4个岩性段<sup>[12-13]</sup>。因地层抬升剥蚀,川西北部地层缺失较多,局部地区雷口坡组四段(简称雷四段)削蚀殆尽。彭州地区雷口坡组

发育碳酸盐台地沉积体系,沉积相带变化频繁。雷四段主要为蒸发台地相<sup>[14-16]</sup>,以潮间带的云坪、藻云坪及灰云坪为优势储层相带;岩性主要为微晶白云岩、细粉晶白云岩、藻屑白云岩、藻纹层白云岩,其次为石灰岩,局部夹薄层膏岩;储集空间以次生孔隙为主,主要为晶间溶孔、藻间溶孔、晶间孔及裂缝等,储层非均质性强,易受后期成岩改造影响;储层具有中低孔、中低渗特征<sup>[14-17]</sup>。雷四段是彭州气田主要含气层段,由上到下可分为3个亚段(图1b),上亚段为有利储层段。

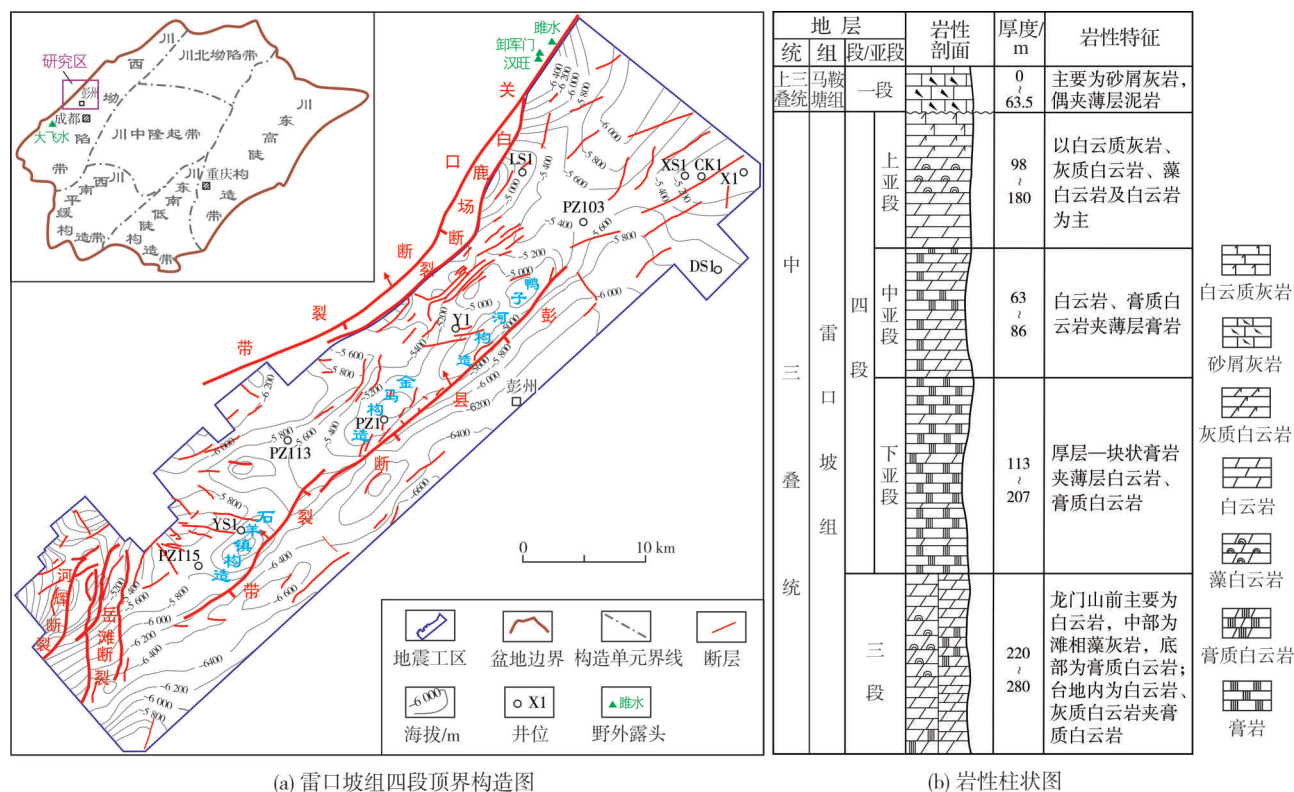


图1 彭州地区中三叠统雷口坡组四段顶界构造及中三叠统岩性柱状图

Fig. 1 Structural map of the Leikoupo Member 4 of Middle Triassic and lithologic column of Middle Triassic in Pengzhou area

## 2 天然裂缝发育特征

笔者按照研究尺度将岩心可见的裂缝称为宏观裂缝,将仅在显微镜下观察到的裂缝称为微裂缝。根据雷口坡组岩心、薄片观察结果,以成因为依据将宏观裂缝划分为构造裂缝(包括张性裂缝、剪性裂缝和破碎状裂缝)和非构造裂缝(包括风化网状裂缝等)。需要说明的是,破碎状裂缝在应力机制上归属剪切裂缝,只是此类裂缝多呈组系、相互平行及雁列式分布,主要是在强烈剪切作用下形

成的。在此基础上,探讨构造裂缝的产状、有效性及发育规模等特征。

### 2.1 宏观裂缝特征

#### 2.1.1 不同成因裂缝特征

本次研究观察岩心裂缝403条,对这些裂缝进行统计发现:剪性裂缝、张性裂缝均发育,剪性裂缝有173条,张性裂缝有145条,分别占43%、36%;部分岩心呈破碎状,共有53条裂缝,占13%;风化网状裂缝共计32组,占8%。可见,构造裂缝是彭州地区雷



口坡组最主要的裂缝类型。

张性裂缝常见于岩层褶皱变形处,具有缝面粗糙不平整(图2a,2b)、形态弯曲不规则、延伸较短、呈组系发育的特点;缝面常见方解石充填,富含黑色泥质。剪性裂缝在岩心中通常具有缝面平直、光滑、分布规则的特点(图2c),常切穿颗粒,延伸长度大,穿层发育,缝面上可见擦痕、阶步等;在露头中常以共轭方式出现,缝面平直光滑(图2d),具有大致等距离发育的特征。破碎状裂缝常表现为多组平行分布的、近垂直层面的构造缝切割岩石,

呈片状(图2e);PZ1井微晶灰岩岩心被多条构造裂缝切割而呈破碎状发育(图2f),缝面干净,可能是裂缝网格化切割岩石形成的破碎带。

非构造裂缝主要为风化网状裂缝,局部可见溶蚀缝、缝合线。受印支早期构造运动影响,地层整体抬升,雷口坡组暴露地表,主要在雷四段和雷三段形成古风化壳。风化网状裂缝常见于不整合面附近<sup>[18-20]</sup>。岩心多处可见风化网状裂缝(图2g—2i),裂缝延伸长度较短、组系散乱、呈网格状系统,常见暗色物质充填。



(a) 张性裂缝。Y1井5 775.33 m, 雷四段



(b) 张性裂缝, 缝面粗糙。Y1井5 775.33 m, 雷四段



(c) 剪性裂缝。PZ1井5 810.05 m, 雷四段



(d) 剪性裂缝, 呈共轭方式出现。卸军门露头, 雷口坡组



(e) 破碎状裂缝, 呈片状。X1井5 729.53 m, 雷四段



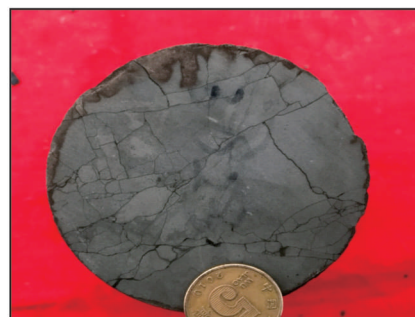
(f) 破碎状裂缝, 可能是裂缝网格化切割岩石形成的破碎带。PZ1井5 820.30 m, 雷四段



(g) 风化网状裂缝。XS1井6 131.50 m, 雷三段



(h) 风化网状裂缝。PZ1井5 719.75 m, 雷四段



(i) 风化网状裂缝, 呈破碎状, 不具有相互切割关系。X1井5 718.42 m, 雷四段

图2 彭州地区雷口坡组岩心宏观裂缝特征

Fig. 2 Characteristics of macro fracture in cores of Leikoupo Formation in Pengzhou area

### 2.1.2 构造裂缝产状及有效性

将研究区构造裂缝按产状分为4种类型,即垂直裂缝(倾角在 $75^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 之间)、高角度裂缝(倾角在 $45^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 之间)、低角度裂缝(倾角在 $15^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 之间)、水平裂缝(倾角小于 $15^{\circ}$ )。对318条构造裂缝(张性裂缝和剪性裂缝)进行统计发现,研究区以垂直裂缝和高角度裂缝为主,低角度裂缝和水平裂缝较少(图3a)。考虑到破碎状裂缝总体占比较低,但个别层段发育密度较高,为较真实地反映整体特征,未把破碎状裂缝纳入统计。

根据裂缝被其他物质充填的情况可划分有效

裂缝和无效裂缝:完全充填的裂缝为无效裂缝,未充填和半充填的裂缝为有效裂缝。统计不同产状裂缝的有效性(图3b)发现:有效裂缝以高角度裂缝和垂直裂缝为主;无效裂缝以低角度裂缝和水平裂缝为主,少部分为垂直裂缝。研究区垂直裂缝和高角度裂缝绝对数量大,岩心上垂直裂缝和高角度裂缝延伸长,最长可达1.5 m,而且开启程度良好,部分裂缝缝宽可达0.1~0.5 cm,这两类裂缝值得重点关注。低角度裂缝和水平裂缝总体发育较少,低角度裂缝多为未充填裂缝,但受到上覆地层的重力作用,往往呈闭合状态,并不能成为油气运移的有效通道。

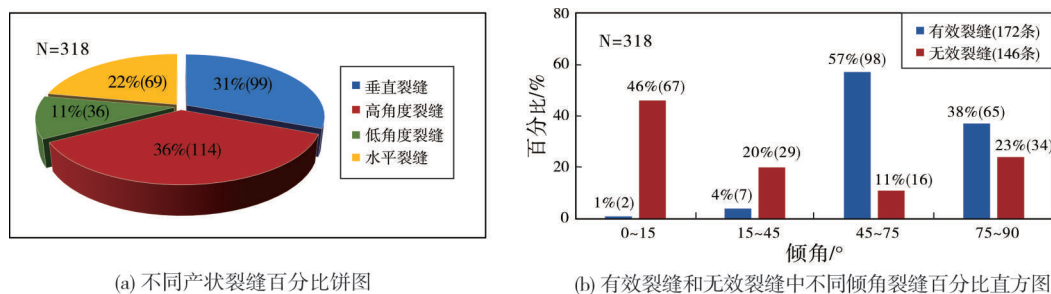


图3 彭州地区不同产状构造裂缝及其有效性分布图

Fig. 3 Distribution of structural fractures with different occurrence and their effectiveness for transporting hydrocarbon in Pengzhou area

### 2.1.3 裂缝发育规模

对研究区雷口坡组9口取心井共403条裂缝的统计(表1)表明:裂缝密度介于0.16~3.05条/米,平均为0.87条/米,其中PZ1井、XS1井和X1井的裂缝密度较高,反映出井间裂缝密度差异大的特点。对不同成因类型的裂缝密度的统计(图4a)表明:张性裂缝和剪性裂缝的密度相差不大,两者均明显高于破碎状裂缝和风化裂缝。对于不同产状的张性裂缝和剪性裂缝(合计318条),高角度裂缝密度最高,低角度裂缝密度最低(图4b)。整体上看,研究区垂直裂缝和高角度裂缝发育密度大。

表1 彭州地区雷口坡组岩心裂缝密度统计表

Table 1 Statistics of fracture density of cores in Pengzhou area

井名	裂缝条数/条	取心长度/m	密度/(条·m <sup>-1</sup> )
YS1井	24	87.40	0.27
Y1井	25	37.16	0.67
XS1井	65	41.70	1.56
X1井	95	50.65	1.88
PZ1井	66	21.62	3.05
DS1井	5	6.38	0.78
LS1井	112	169.74	0.66
PZ103井	5	31.30	0.16
PZ115井	6	16.00	0.38

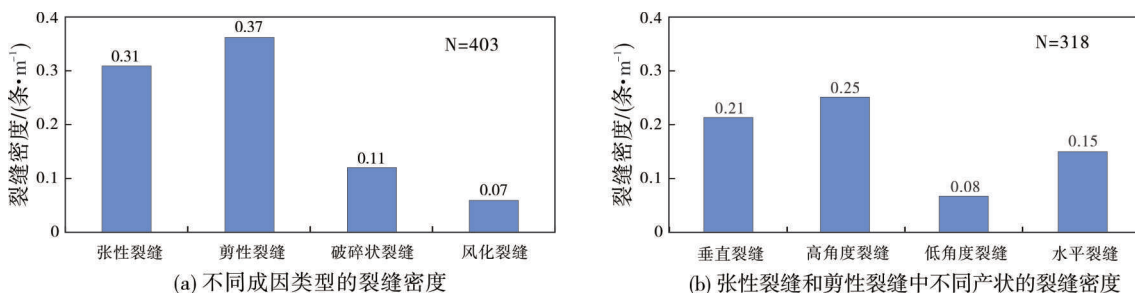


图4 彭州地区裂缝密度分布图

Fig. 4 Histograms of fracture density in Pengzhou area



## 2.2 微裂缝特征

薄片观察(73片)发现:研究区雷口坡组微裂缝的张开度与孔隙、孔喉直径处于同一量级,通常小于 $50\text{ }\mu\text{m}$ ,多在 $10\sim 40\text{ }\mu\text{m}$ 之间,少数可达数百微米。一般切穿颗粒的微裂缝规模较大,延伸较长,其张开度往往大于 $10\text{ }\mu\text{m}$ ,主要为 $10\sim 50\text{ }\mu\text{m}$ ;而绕颗粒的微裂缝规模较小,延伸较短,张开度通常小于 $10\text{ }\mu\text{m}$ ,很少能够达到 $20\text{ }\mu\text{m}$ 。微裂缝面密度相差不大,大多为 $1\sim 5$ 条/面,平均面密度为 $2.5$ 条/面。

微裂缝主要类型有单一型微裂缝、共轭型微裂缝、平行组系微裂缝、网状微裂缝和缝合线(图5)。

对939条微裂缝的统计表明:单一型微裂缝普遍发育,占微裂缝总数的43%;其次为网状微裂缝和平行组系微裂缝,分别占28%和17%;缝合线和共轭型微裂缝少量发育,分别占7%和5%。单一型微裂缝中,构造缝缝面平直光滑(图5a);溶蚀缝形态多样,呈弯曲状,缝面不平整(图5b)。微裂缝常切穿颗粒、骨架,共轭型和网状微裂缝相互切割现象明显(图5c—5f),反映出裂缝形成的先后。平行裂缝常呈组系发育,缝宽较为均匀(图5g,5h)。此外,在YS1井雷口坡组有部分层段受到强烈溶蚀作用,缝合线大量发育(图5i),呈锯齿状,绕颗粒发育,有压溶现象。

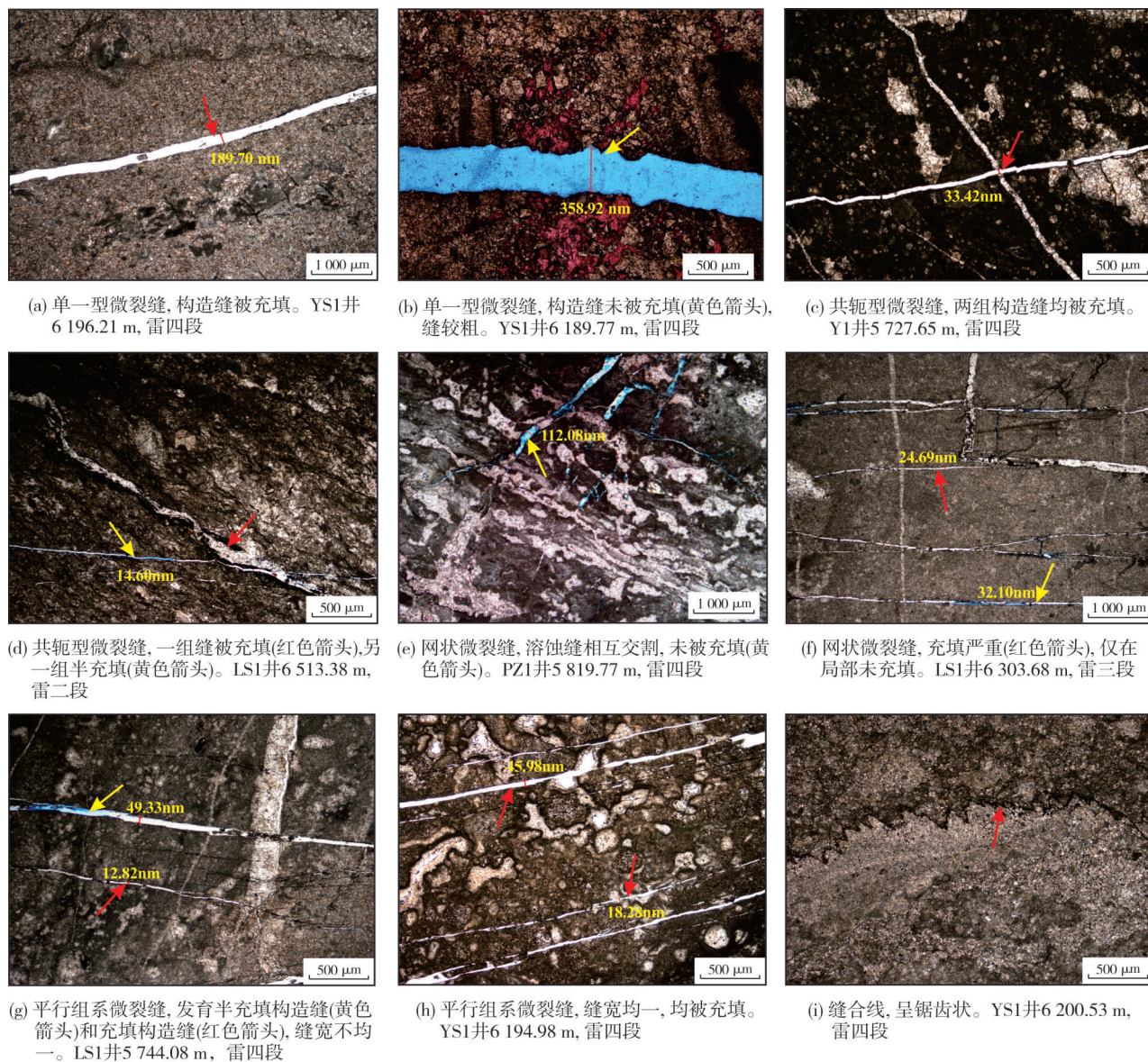


图5 彭州地区雷口坡组微裂缝特征(铸体薄片, 单偏光)

Fig. 5 Characteristics of micro fracture of Leikoupo Formation in Pengzhou area (casting thin section, plane-polarized light)



微裂缝大多处于充填、半充填状态,只有少数未充填,总体有效性较差。对不同类型微裂缝的充填程度进行对比发现,在单一型微裂缝中充填微裂缝占比远高于未充填、半充填微裂缝,网状微裂缝和平行组系微裂缝的半充填比例明显升高。微裂缝在一定程度上有助于改善储层孔隙结构和整体性能。

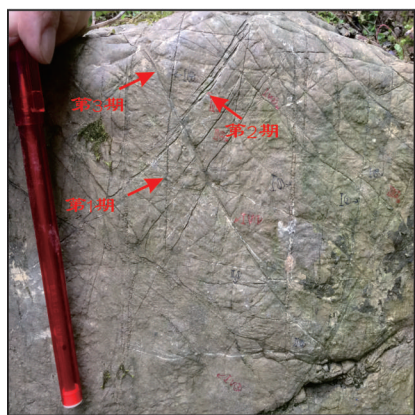
### 3 裂缝形成期次

#### 3.1 露头、岩心及薄片分析

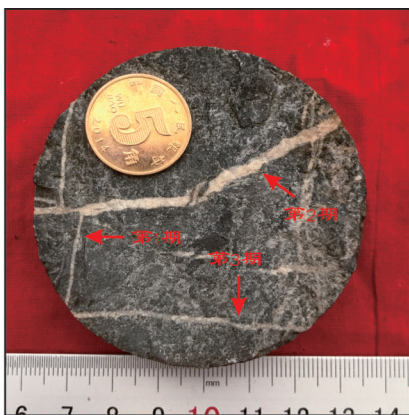
基于野外露头、钻井岩心及薄片裂缝之间的切割、组合关系判断裂缝形成的先后顺序,认为研究区

至少存在3~4期天然裂缝。大飞水露头雷口坡组岩性为白云岩,地层产状为 $130^{\circ}\angle 56^{\circ}$ ,见3期构造裂缝相互切割(图6a),裂缝中均有方解石充填现象,反映出雷口坡组沉积以来至少经历了3期构造运动。第1期裂缝产状为 $130^{\circ}\angle 85^{\circ}$ ,为高角度裂缝或垂直裂缝,纵向贯穿程度高;第2期裂缝产状为 $130^{\circ}\angle 47^{\circ}$ ;第3期裂缝产状为 $310^{\circ}\angle 55^{\circ}$ ,贯穿程度高。

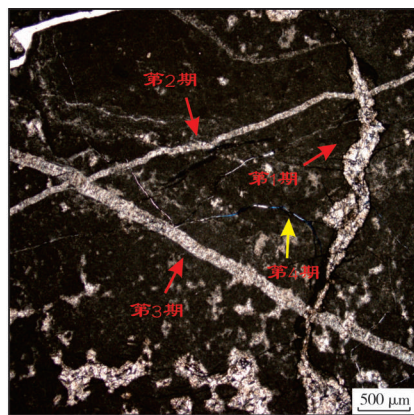
岩心中可见3期裂缝(图6b),均被方解石充填:第1期、第3期为构造缝,第2期为非构造缝,第1期被第2期切割的关系明显,反映出至少经历了3期构造运动。



(a) 3期构造裂缝相互切割:第1期为南北向,第2期为北北东向,第3期为北北西向。大飞水剖面,雷口坡组



(b) 3期天然裂缝:第1期、第3期为构造缝,第2期为非构造缝,均被方解石充填。LS1井6 303.29 m,雷三段。岩心



(c) 4期天然裂缝特征:第1期为非构造缝,第2期、第3期为构造缝,第4期为沥青半充填微裂缝(黄色箭头)。PZ1井5 821.60 m,雷四段。铸体薄片,单偏光

图6 彭州地区雷口坡组构造裂缝发育期次特征

Fig. 6 Characteristics showing developing stages of the structural fracture of Leikoupo Formation in Pengzhou area

薄片见4期裂缝(图6c):第1期为早期的风化裂缝,形态不规则;第2期和第3期见方解石充填;第4期裂缝为沥青半充填。由图6c可见,早期裂缝多被方解石充填,中晚期有效裂缝数量增多,受排烃影响有机质充填物增加。

#### 3.2 碳氧同位素分析

埋藏条件下裂缝形成会使地下饱和地层水第一时间进入裂缝并沿缝面流动,析出的矿物晶体会附着于缝面之上。地质演化过程中不同的成岩环境和成岩流体性质使得析出晶体的碳氧稳定同位素值也具有明显差异<sup>[21]</sup>。在对岩心发育的裂缝进行分期配套并划定裂缝的期次后,提取对应不同期次的裂缝充填物进行碳氧同位素实验,圈定不同期次裂缝充填物碳氧同位素值的分布范围,

再结合氧同位素测温和埋藏史分析判断裂缝期次。对研究区露头和岩心孔洞、裂隙的方解石充填物进行碳氧同位素分析,由图7可见,孔洞缝中的方解石充填物碳氧同位素分布可分为3个区域,反映了裂缝形成的3个期次:第1期裂缝充填物 $\delta^{18}\text{O}$ 值介于 $-2.73\text{‰}$ ~ $-1.97\text{‰}$ ,平均为 $-2.35\text{‰}$ , $\delta^{13}\text{C}$ 值介于 $1.74\text{‰}$ ~ $2.69\text{‰}$ ,平均为 $2.22\text{‰}$ ;第2期裂缝充填物 $\delta^{18}\text{O}$ 值介于 $-7.44\text{‰}$ ~ $-3.91\text{‰}$ ,平均为 $-5.40\text{‰}$ , $\delta^{13}\text{C}$ 值分布为 $0.34\text{‰}$ ~ $1.67\text{‰}$ ,平均为 $1.16\text{‰}$ ;第3期裂缝充填物 $\delta^{18}\text{O}$ 值介于 $-8.96\text{‰}$ ~ $-6.41\text{‰}$ ,平均为 $-7.49\text{‰}$ , $\delta^{13}\text{C}$ 值介于 $-0.72\text{‰}$ ~ $0.85\text{‰}$ ,平均为 $0.01\text{‰}$ 。充填物形成时间越晚, $\delta^{18}\text{O}$ 值越低,第3期充填物 $\delta^{13}\text{C}$ 值明显降低,可能是受燕山中期开始大规模排烃的影响,有机质生成大量烃类物质,这会使碳同位素变轻<sup>[22]</sup>。

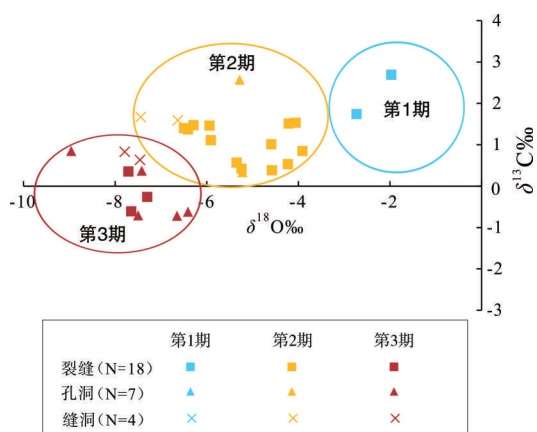


图7 彭州地区裂缝、孔洞充填物碳氧稳定同位素交会图

Fig. 7 Crossplot of carbon and oxygen isotopes of the cements of fractures and vugs in Pengzhou area

采用Fritz等<sup>[23]</sup>提出的氧同位素测温方程,对样品裂缝形成时的温度进行计算:

$$T = 31.9 - 5.55(\delta^{18}\text{O} - \delta^{18}\text{O}_w) + 0.7(\delta^{18}\text{O} - \delta^{18}\text{O}_w)^2 \quad (1)$$

式中: $T$ 为方解石形成时的温度, $^{\circ}\text{C}$ ;  $\delta^{18}\text{O}$ 为方解石氧同位素值; $\delta^{18}\text{O}_w$ 为形成矿物时的水介质氧同位素值,取 $-0.5\text{‰}$ 。在此基础上,按研究区常年平均地面温度 $20^{\circ}\text{C}$ 、地温梯度 $2.65^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ,可计算得到裂缝形成时的埋深,再结合研究区埋藏史分析<sup>[24]</sup>可大致推断相应的地质时期:第1期裂缝充填物 $\delta^{18}\text{O}$ 值介于 $-2.73\text{‰}$ ~ $-1.97\text{‰}$ ,折算埋深为 $800\sim 1\,050\text{ m}$ ,对应印支早期;第2期裂缝充填物 $\delta^{18}\text{O}$ 值介于 $-7.44\text{‰}$ ~ $-3.91\text{‰}$ ,折算埋深为 $1\,500\sim 3\,150\text{ m}$ ,对应印支中一晚

期;第3期裂缝充填物 $\delta^{18}\text{O}$ 值介于 $-8.96\text{‰}$ ~ $-6.41\text{‰}$ ,折算埋深为 $2\,600\sim 4\,100\text{ m}$ ,对应燕山早—中期。

### 3.3 声发射测试分析

当岩石所受应力大于最大先期应力时,会出现明显的声发射信号。在声发射曲线图中,累积能量曲线上的Kaiser效应点(简称为K点),可用于反映岩石受应力而损伤变形的情况<sup>[25]</sup>。对采自于龙门山山前汉旺、卸军门、睢水等地的样品(雷口坡组及上覆马鞍塘组),在单轴加载条件下测定样品受压时的声发射信号。在图8所示的声发射曲线图中,累积能量采用以10为底的对数,累积能量曲线上的4个K点表明雷口坡组沉积以来至少经历了4期构造运动。综合区域埋藏史、沉积记录和古构造等分析<sup>[26-28]</sup>,川西坳陷上三叠统至第四系经历了印支期、燕山期和喜马拉雅期等3个构造旋回,雷口坡组主要经历了4期构造运动。根据水压致裂资料,现今露头条件下的地应力平均值为 $60\text{ MPa}$ ,与第4个K点的应力值比较接近,故认为第4个K点的轴向应力对应喜马拉雅期的应力。这4个期次的古应力具有逐步增加的特点,结合区域应力演化特征分析<sup>[29-30]</sup>,前3个K点分别与印支中—晚期、燕山早—中期、燕山晚期构造运动对应。通过岩石声发射曲线可确定印支中—晚期平均主应力为 $27.5\text{ MPa}$ ,燕山早—中期平均主应力为 $35.2\text{ MPa}$ ,燕山晚期平均主应力为 $45.8\text{ MPa}$ ,喜马拉雅期平均主应力为 $55.4\text{ MPa}$ 。

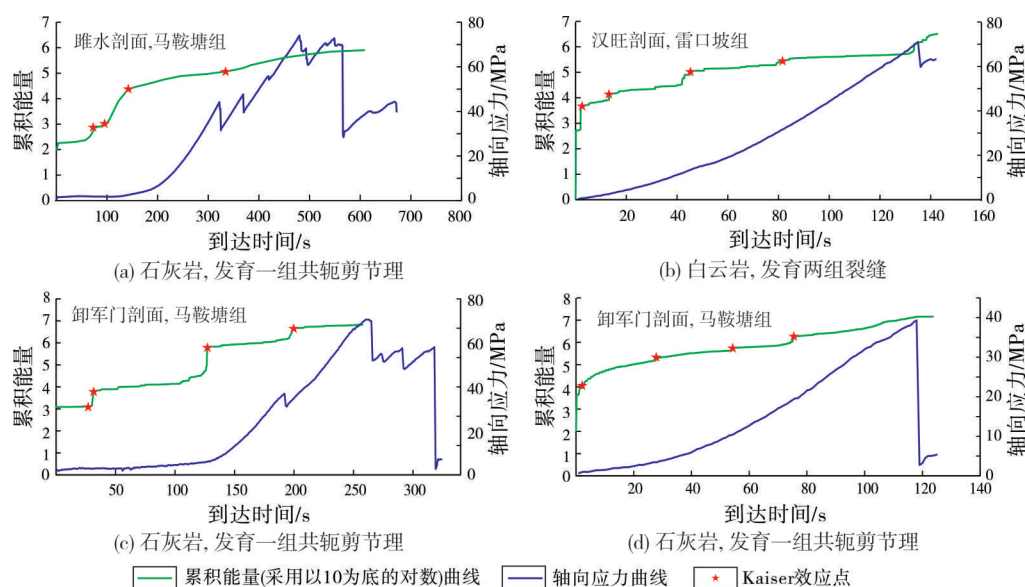


图8 川西中三叠统露头样品岩石声发射曲线

Fig. 8 Acoustic emission curve of outcrop samples of Middle Triassic in Western Sichuan Basin



声发射实验结果可反映构造成因裂缝的期次<sup>[31]</sup>。川西地区雷口坡组沉积以来形成了4期构造裂缝,分别对应印支中—晚期、燕山早—中期、燕山晚期和喜马拉雅期构造运动。

### 3.4 裂缝形成期次及有效性综合评价

综合露头、岩心、薄片观察以及裂缝充填物碳氧同位素、声发射实验结果,认为彭州地区雷口坡组主要发育4期构造裂缝和1期风化裂缝,构造裂缝分别发育于印支中—晚期、燕山早—中期、燕山晚期和喜马拉雅期,风化裂缝发育于印支早期。

印支早期研究区雷口坡组顶部风化壳形成,产生风化裂缝;印支中期研究区成为山前坳陷,印支晚期龙门山冲断带持续发生构造变形,研究区形成大量构造裂缝。印支早期风化裂缝和印支中—晚期构造裂缝在燕山早期前多被方解石、石膏等充填,并且早于燕山中—晚期的烃源岩大规模排烃期,因此该时期形成的裂缝对油气储集、运移的作用较小<sup>[32-34]</sup>。燕山期和喜马拉雅期构造裂缝均是对已经产生的裂缝进行调整改造,在原来裂缝的基础上延伸并且产生新的裂缝。

综合研究区雷口坡组裂缝特征、期次分析,应重点关注燕山期—喜马拉雅期的垂直裂缝和高角度裂缝,它们与断裂一起连通烃源岩,对油气富集以及后续的开发高产意义较大。微裂缝由于充填程度高,有效性较差。

## 4 结论

(1)川西彭州地区宏观裂缝(岩心可见)按成因可分为构造裂缝和非构造裂缝,构造裂缝包括张性裂缝、剪性裂缝和破碎状裂缝,非构造裂缝主要为风化网状裂缝。宏观裂缝以构造裂缝为主,主要为剪性裂缝和张性裂缝,其中的垂直裂缝、高角度裂缝的发育密度和有效性较高。微裂缝(镜下可见)有效性较差,对储层的影响程度低。

(2)通过野外露头、岩心、薄片观察和孔洞缝方解石充填物碳氧同位素以及声发射实验分析,确定研究区雷口坡组主要发育4期构造裂缝和1期风化裂缝,构造裂缝形成于印支中—晚期、燕山早—中期、燕山晚期和喜马拉雅期,风化裂缝发育在印支早期。

(3)印支早期的风化裂缝和印支中—晚期的构造裂缝,其形成均早于燕山中—晚期烃源岩的大规

模排烃期,且多被方解石和石膏等充填,故对研究区油气运移储集的作用较小。燕山中晚期—喜马拉雅期的垂直裂缝和高角度裂缝绝对数量大且有效性高,对研究区天然气成藏及气藏开发具有重要意义。

### 参考文献

- [1] 汪华,刘树根,王国芝,等.川中南部地区中三叠统雷口坡组顶部古岩溶储层研究[J].物探化探计算技术,2009,31(3):264-270.
- [2] 胡焯,袁晓宇,王彦青,等.四川盆地川西坳陷印支早期古隆起发育特征及控油气作用[J].石油实验地质,2018,40(5):650-654.
- [3] 马治鸾,陈洪德,钟怡江,等.四川盆地东北部元坝地区中三叠统雷口坡组四段古岩溶特征及其油气地质意义[J].地质通报,2012,31(4):577-585.
- [4] 施振生,赵正望,金惠,等.四川盆地上三叠统小塘子组沉积特征及地质意义[J].古地理学报,2012,14(4):477-486.
- [5] 金之钧,蔡勋育,刘金连,等.中国石油化工股份有限公司近期勘探进展与资源发展战略[J].中国石油勘探,2018,23(1):14-25.
- [6] 赵向原,胡向阳,肖开华,等.川西彭州地区雷口坡组碳酸盐岩储层裂缝特征及主控因素[J].石油与天然气地质,2018,39(1):30-39.
- [7] 罗啸泉,郭东晓.川西断裂分布特征与油气的关系[J].西南石油学院学报,2004,26(6):17-20.
- [8] 杨长清,刘树根,曹波,等.龙门山造山带与川西前陆盆地耦合关系及其对油气成藏的控制[J].成都理工大学学报(自然科学版),2008,35(4):471-476.
- [9] 李耀华,李宗银,李红亮,等.川西前陆盆地须家河组圈闭评价[J].天然气工业,2005,25(S1):11-13.
- [10] 叶朝阳,秦启荣,龙胜祥,等.川西飞仙关组海相碳酸盐岩储层特征与评价[J].岩性油气藏,2009,21(1):61-65.
- [11] 揭君晓.川西坳陷中段中三叠统雷口坡组碳酸盐岩油气储层特征研究[D].贵阳:贵州大学,2008.
- [12] 周进高,辛勇光,谷明峰,等.四川盆地中三叠统雷口坡组天然气勘探方向[J].天然气工业,2010,30(12):16-19.
- [13] 赵向原,胡向阳,肖开华.川西南部龙门山前构造带雷口坡组碳酸盐岩储层裂缝特征及主控因素[C]//中国石油学会天然气专业委员会.2017年全国天然气学术年会论文集.杭州,2017:345-355.
- [14] 高恒逸,邓美洲,李勇,等.川西彭州地区中三叠统雷口坡组四段储层特征及成岩作用[J].海相油气地质,2018,23(1):37-46.
- [15] 李书兵,许国明,宋晓波.川西龙门山前构造带彭州雷口坡组大型气田的形成条件[J].中国石油勘探,2016,21(3):74-82.
- [16] TIAN Han, ZHANG Jianyong, XIN Yongguang, et al. Reservoir characteristics and forming conditions for the Middle Triassic Leikoupo Formation in the western Sichuan Basin, China [J]. Journal of natural gas geoscience, 2019, 4(2): 101-110.



- [17] 周凌方, 钱一雄, 宋晓波, 等. 四川盆地西部彭州气田中三叠统雷口坡组四段上亚段白云岩孔隙表征、分布及成因[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(1): 177-188.
- [18] 胡向阳, 赵向原, 宿亚仙, 等. 四川盆地龙门山前构造带中三叠统雷口坡组四段碳酸盐岩储层裂缝形成机理[J]. 天然气工业, 2018, 38(11): 15-25.
- [19] 甘学启, 宋文燕, 王志萍. 裂缝对川中雷口坡组风化壳储层发育的影响[J]. 特种油气藏, 2013, 20(4): 53-57.
- [20] JIANG Lei, XU Zhaohui, SHI Shuyuan, et al. Multiphase dolomitization of a microbialite-dominated gas reservoir, the middle Triassic Leikoupo Formation, Sichuan Basin, China [J]. Journal of petroleum science and engineering, 2019, 180: 820-834.
- [21] 高飞, 王念喜, 乔向阳, 等. 基于古盐度、古水温的白云岩成岩环境分析: 以鄂尔多斯盆地东南部延长探区马五<sub>1</sub>亚段为例[J]. 非常规油气, 2019, 6(5): 47-53.
- [22] 邓虎成, 周文, 姜文利, 等. 鄂尔多斯盆地麻黄山西区块延长、延安组裂缝成因及期次[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2009, 39(5): 811-817.
- [23] FRITZ P, SMITH D G W. The isotopic composition of secondary dolomites[J]. Geochimica et cosmochimica acta, 1970, 34(11): 1161-1173.
- [24] 付于真. 龙门山中—南段冲断带构造演化与流体的运移聚集研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2011.
- [25] 李智武, 罗玉宏, 刘树根, 等. 川东北地区岩石声发射实验及历史构造应力研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2005, 32(6): 614-620.
- [26] 蔡左花, 冯霞, 刘诗荣, 等. 川西坳陷XC构造带雷口坡组顶部风化壳储层预测[J]. 海相油气地质, 2014, 19(4): 50-56.
- [27] 邹云. 川西坳陷合兴场、东泰、罗江地区构造演化及断裂活动期次[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2010.
- [28] 伍顺利. 川西北段地质结构及其控油气作用[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
- [29] 白斌, 邹才能, 朱如凯, 等. 川西南部须二段致密砂岩储层构造裂缝特征及其形成期次[J]. 地质学报, 2012, 86(11): 1841-1846.
- [30] 何龙, 郑荣才, 梁西文, 等. 川东涪陵地区大安寨段裂缝控制因素及期次分析[J]. 岩性油气藏, 2014, 26(4): 88-96.
- [31] 徐文礼, 郑荣才, 费怀义, 等. 土库曼斯坦阿姆河右岸卡洛夫—牛津阶裂缝特征及形成期次[J]. 天然气工业, 2012, 32(4): 33-38.
- [32] 陶海. 论川西燕山期的构造演化及油气勘探[J]. 四川地质学报, 1994, 14(1): 44-52.
- [33] 万元博. 川西南地区构造演化及其对中三叠统雷口坡组油气聚集的影响[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
- [34] 梅庆华. 四川盆地乐山—龙女寺古隆起构造演化及其成因机制[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.

编辑: 董庸

## Development characteristics and formation stages of natural fractures of the Triassic Leikoupo Formation in Pengzhou area of Western Sichuan Basin

XIA Yu, DENG Hucheng, WANG Yuanyuan, HE Jianhua, XIE Xinhui, TENG Juan

**Abstract:** Based on outcrop, core, thin section and geochemical data, the development characteristics and formation stages of natural fractures of Leikoupo Formation in Pengzhou area of Western Sichuan Depression, Sichuan Basin were studied. The macro fractures in the study area can be divided into structural fractures and non-structural fractures according to their genesis. The structural fractures include tensile fractures, shear fractures and broken fractures, while the non-structural fractures are mainly weathering fractures. The macro fractures are mainly structural fractures (shear fractures and tensile fractures), in which the vertical fractures and high angle fractures have higher development density and effectiveness. Micro fracture has high filling degree, poor effectiveness and so has little influence on reservoir. The Leikoupo Formation in the study area mainly developed four stages of structural fractures and one stage of weathering fractures. The structural fractures were formed in the middle to late Indosinian, early to middle Yanshanian, late Yanshanian and Himalayan, and the weathering fractures were developed in the early Indosinian. The Indosinian fractures have been filled with calcite and gypsum before the large-scale expulsion of hydrocarbon from the source rocks in the middle and late Yanshanian, which is of little significance to the enrichment of oil and gas. The vertical fractures and high angle fractures formed in the middle and late Yanshanian and Himalayan are of great significance to the gas development of Leikoupo Formation in Pengzhou area. This study provides a basis for further comprehensive evaluation of reservoir characteristics and gas enrichment in the study area.

**Key words:** fracture characteristics; fracture genesis; Leikoupo Formation; Pengzhou area; Sichuan Basin

**XIA Yu,** First author: Master candidate, mainly engaged in unconventional oil and gas geology. Add: College of Energy, Chengdu University of Technology, Chenghua District, Chengdu, Sichuan 610059, China