

南大巴山前陆冲断褶皱带断裂流体地球化学特征及构造保存研究

周业鑫^{1,2,3)}, 丁俊²⁾, 余谦^{2,3)}, 王剑^{2,3)}, 熊国庆^{2,3)},
门玉澎^{2,3)}, 熊小辉^{2,3)}, 邓奇^{2,3)}

1) 成都理工大学地球科学学院, 成都, 610059; 2) 中国地质调查局成都地质调查中心, 成都, 610081;
3) 国土资源部沉积盆地与油气资源重点实验室, 成都, 610081

内容提要:南大巴山前陆构造带位于城口断裂与铁溪-巫溪断裂之间,为研究该构造带断裂对烃类运移及构造对页岩气保存的影响,本文对该构造带内断裂流体的碳氧同位素和流体包裹体进行了测试分析。测试结果显示,研究区断裂流体碳氧同位素整体较围岩更为分散, $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 介于 $-2.9\text{‰}\sim 3.9\text{‰}$ 之间,属正常海相碳酸盐层的碳同位素值,坪坝断裂附近 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 呈明显亏损,具外来流体混合的特征。流体包裹体为含烃的气液二相盐水包裹体,气相成分为 CH_4 ,液相为 H_2O 。包裹体均一温度以城口断裂附近最高,主要为 $311\sim 336\text{℃}$,频率峰值温度为 328℃ ;往南叠瓦带流体均一温度主要位于 $183\sim 269\text{℃}$ 之间,峰值为 230℃ ,断褶皱峰值为 213℃ ,滑脱褶皱带为 170℃ ,整体表现为向盆内方向降低。盐度主要为 $4.43\%\sim 8.6\%\text{NaCl}$ 。研究表明,城口断裂作为大巴山构造带南北分界的主干断裂,古流体的形成温度和热演化程度最高,且从盆地向北至城口断裂,各构造带流体的热演化程度、成岩温度、古流体压力均逐渐升高,说明随着构造活动的增强,构造带中的流体更为活跃,持续时间更长,导致流体形成的深度和温度变化较大。构造带内的流体总体上形成于封闭体系,在主构造应力的驱动下,盆地深部含烃流体沿断裂向浅部运移,并与浅部地层流体发生混合,运移通道整体处于封闭状态;而构造带内的一些次级断裂,因其形成的时间以及向下延伸的深度不足以触及下古生界烃源岩层,因此其对流体封闭性的影响有限。

关键词:碳-氧同位素;流体包裹体;断裂流体;断层封闭性;南大巴山前陆冲褶皱带

近年来,国内外学者运用断裂流体封存的包裹体,开展了大量岩相学、显微测温、激光拉曼光谱分析等方面的研究,通过获得包裹体的捕获压力、均一温度、盐度等,从而开展成矿流体来源与成矿机制、推断油气运聚成藏的规律等研究,取得了丰硕的成果(Ni Pei et al., 2014; Liu Dehan et al., 2005; Zhang Nai et al., 2010; Wang Feiyu et al., 2005; Ou Guangxi et al., 2006; Pan Liyin et al., 2007)。大巴山前陆构造带的构造流体研究是近年来的研究热点,其主要目的是明确该构造带的油气成藏规律与油气保存条件,评价其是否具备油气勘探开发的潜力。前人对此做了较为翔实的研究,但仍存在较为明显的分歧。Li Rongxi et al. (2013)通过对纤维状方解石脉包裹体的研究,认为其由超高压构造应力驱动下天然气排泄和运移而形成,并指出该构造

带在印支-燕山构造运动阶段的隆起使天然气藏破坏或改造。Li Fei et al. (2014)认为形成于喜山期的断裂流体受到大气水下渗,油气的保存条件较差。而 Zeng Jianhui (2010)研究认为,尽管下部油气成藏组合(即下古生界烃源岩组合)在位于城口断裂和鸡鸣寺断裂处显示具大气降水入渗的特征,但因下部成藏组合埋藏深度较大,故对其影响可能不大。以上研究均是对整个大巴山构造带的研究,本文将着重针对南大巴山前陆冲褶皱带的各构造流体,通过对断裂流体的碳氧同位素组合、包裹体成分、包裹体均一温度、盐度等方面的测试,系统分析南大巴山前陆褶皱冲断带的断裂流体性质、来源及形成时间、期次、形成深度等,探讨研究区内断裂流体性质,定性判断断层的封闭性,最终为南大巴山构造带页岩气保存条件研究和页岩气勘探开发提供服务。

注:本文为四川盆地地下古生界海相页岩气基础地质调查(编号 DD20160176)、重庆市页岩气专项地质调查(渝东北)、重庆市页岩气勘探有利区带优选及资源量评价研究(渝东北)、国家自然科学基金(批准号: 41672112、41402103)共同资助的成果。
收稿日期:2016-08-21;改回日期:2017-03-20;责任编辑:黄敏。
作者简介:周业鑫,男,1987 年生。博士,主要从事沉积地质与油气构造方向的研究。Email: zhouyexin163@qq.com。通讯作者:丁俊,男,1954 年生。研究员,博士生导师,主要从事地层古生物、构造地质、矿产地质研究。Email:13980689100@163.com。

1 区域概况

大巴山前陆构造带在构造位置上处于上扬子板块北缘,为上扬子板块与秦岭造山带的过渡带(Liu Shugen,2006;Li Jinxi et al.,2015;Li Zhiwu et al.,2006;Huang Guangming et al.,2016;Wang Jianqi et al.,2016)。该构造带以城口断裂为界,分为北大巴山逆冲推覆构造带和南大巴山前陆褶皱—冲断带。研究区位于城口断裂、铁溪-巫溪隐伏断裂之间,整体上呈向南西凸出的弧形构造带(Luo Liang et al.,2015;Liu Shugen,2006;Li Zhiwu et al.,2006)。该弧形构造带以坪坝断裂、鸡鸣寺断裂为界划分为三个次级构造单元,由北向南分别为叠瓦断层带(Ⅱ₁)、断层—褶皱带(Ⅱ₂)和滑脱褶皱带(Ⅱ₃) (图1)。

近年研究表明,南大巴山前陆冲断褶皱带主要经历了印支期、燕山期和喜山期构造运动的叠加改造(Zeng Jianhui et al.,2010)。印支期扬子板块与华夏板块碰撞拼合,形成秦岭造山带,发育北大巴逆冲带及南大巴山前陆凹陷带(Dong Shuwen et al.,2010;Zhang Guowei et al.,1996;Zhang Yueqiao et al.,2010);早燕山期的陆内造山作用,使得南大巴

前陆弧形构造带形成并定型(Dong Yunpeng et al.,2008;Hu Jianmin et al.2008);喜山运动使南大巴主体隆升,构造活动趋于稳定(Cheng Wanqiang et al.,2009)。

2 样品测试

2.1 样品来源

为揭示断裂附近流体的来源,笔者分别在南大巴山前陆冲褶带的叠瓦断层带、断层—褶皱带、滑脱褶皱带三个次级构造带共采集了样品18件(图1),均为构造裂隙充填的脉体,主要为方解石脉,少量包裹体样品为石英脉。脉体主要见于寒武系、奥陶系和二叠系的灰岩或粉砂质泥岩裂隙中。脉体产状主要有两种类型:一类为层内张性节理充填的脉体,脉宽为1~2cm,其延续性较差,高角度或垂直层面分布;另一类为压性剪节理充填的脉体,脉宽2~4cm,连续性较好(图2)。

2.2 测试方法

为避免测试的样品碳、氧同位素受围岩成岩蚀变的影响,保证样品尽可能代表原始流体的同位素组成,笔者在制样过程中,首先选择了宽度大于2cm的脉体,并采用专用小钻头提取脉体中央的纯净方

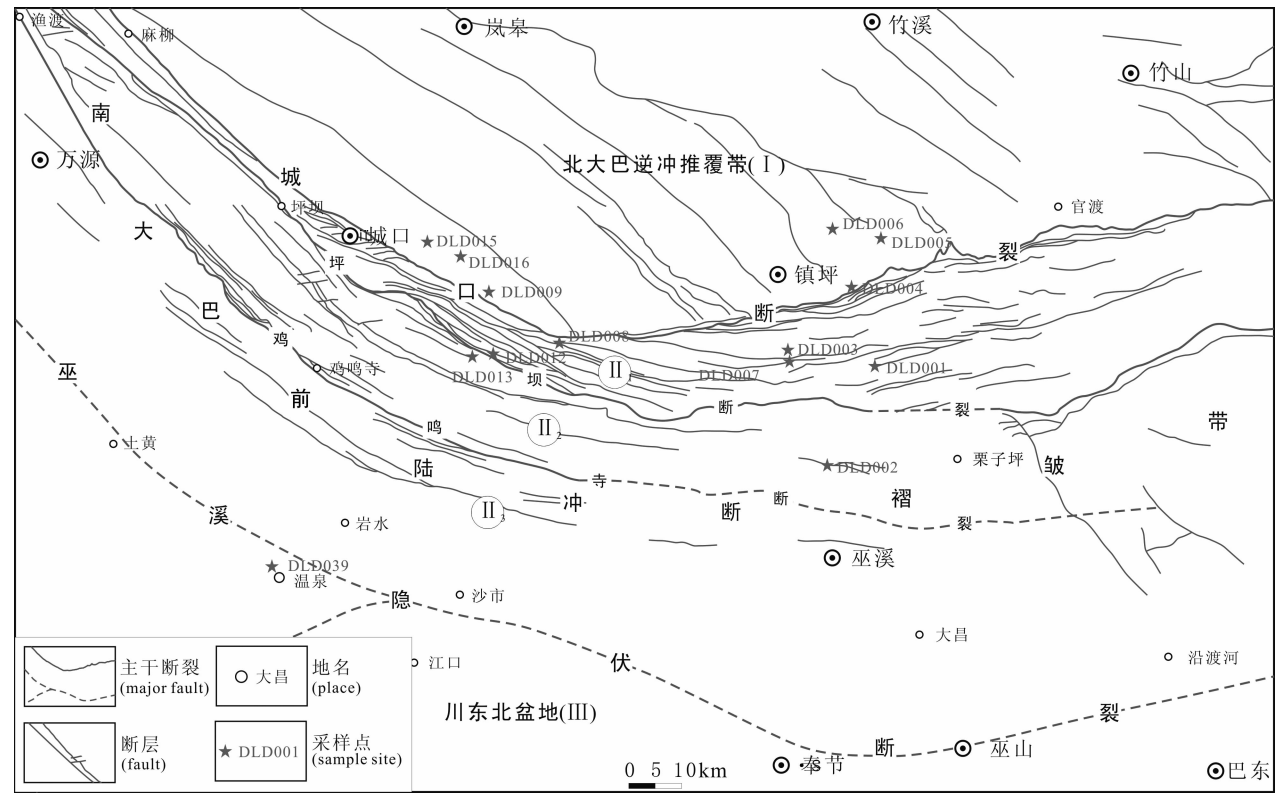


图1 南大巴山前陆冲断褶皱带断裂分布图及采样位置

Fig. 1 Fracture distribution map and sampling location of the southern Daba Shan foreland thrust-fold belts

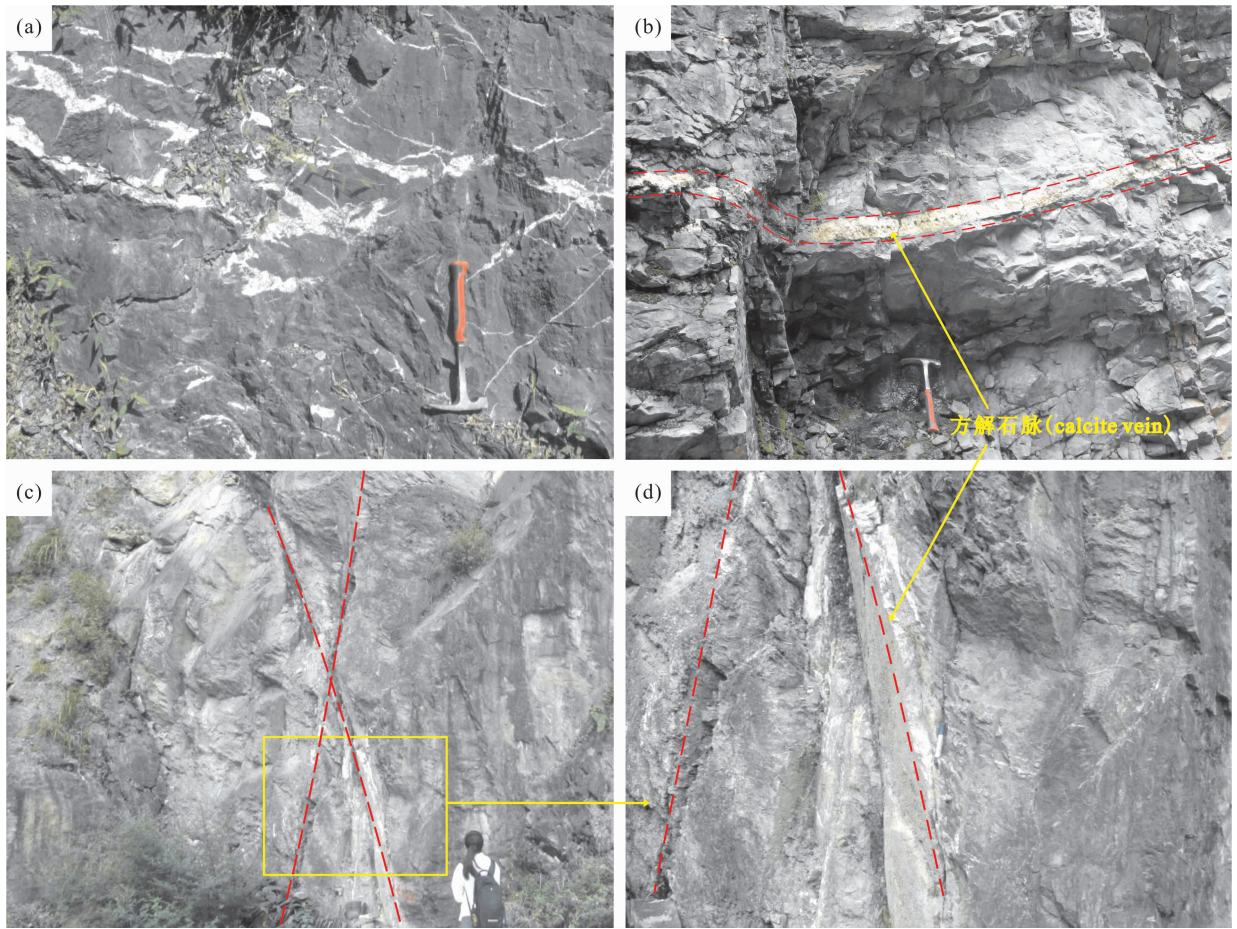


图 2 南大巴山冲断褶皱带方解石脉产状

Fig. 2 Occurrence of calcite vein of the southern Daba Shan foreland thrust-fold belts

(a)—张裂隙方解石脉;(b)—剪切裂缝方解石脉;(c-d)—共轭节理方解石脉

(a)—calcite vein of tension fractures;(b)—calcite vein of shearing crack;(c-d)—calcite vein of conjugate joints

解石;测试由国土资源部沉积盆地与油气资源重点实验室完成,测试仪器为德国 MAT 253 型气体稳定同位素比值质谱仪,误差为 $\pm 0.1\text{‰}$ 。

流体包裹体分析由国土资源部西南矿产资源监督检测中心完成。冰点温度、均一温度等使用 LINKAM THMS600 型冷热台,分析精度为 $\pm 0.1\text{℃}$ (Cui Yuliang et al., 2017)。激光拉曼分析采用 Renishaw inVia Reflex 显微激光拉曼光谱仪,根据实验要求,扫描范围为 $100\sim 4000\text{cm}^{-1}$,扫描时间 30s,分辨率为 1cm^{-1} 。

3 分析结果

3.1 C—O 同位素组成

测试数据分析显示(表 1),方解石脉的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值分布范围为 $-7.9\text{‰}\sim 3.9\text{‰}$,平均值为 -0.1‰ ; $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 均为高负值,其分布范围为 $-15.7\text{‰}\sim -8.3\text{‰}$,平均值为 -11.2‰ ;其中,大部分样品

$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值分别介于 $-2.9\text{‰}\sim 3.9\text{‰}$ 、 $-12\text{‰}\sim -8.3\text{‰}$ 之间,仅坪坝断裂附近的 DLD012 点 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 为 -7.8‰ , $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 为 -15.6‰ ,明显低于其它样品值。据前人文献资料显示(Xu Tianwu et al., 2009; Li Fei et al., 2014),大巴山地区碳酸盐岩围岩的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值为 $-4.4\text{‰}\sim 3.0\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 为 $-16.4\text{‰}\sim -5.1\text{‰}$,通过对比发现,断裂方解石脉碳、氧同位素分布较为分散,其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 与围岩均有一定的差异性。

3.2 包裹体特征

对南大巴山前陆带断裂流体包裹体鉴定发现,包裹体赋存的主矿物以方解石为主,少量为石英。包裹体多呈独立分布(图 3a),少量成群或成串分布(图 3b);其形态以不规则形为主(图 3c、d),少量呈椭圆形,长轴粒径主要在 $2\sim 10\mu\text{m}$ 之间,少量 $> 10\mu\text{m}$,而 DLD039 包裹体不发育,仅可见少量长轴粒径 $\leq 1\mu\text{m}$ 的包裹体。包裹体类型以富液相的气液

表 1 大巴山前陆构造带断裂充填的方解石脉
C-O 同位素测试结果

Table 1 Test results of carbon and oxygen isotope of fracture filling calcite vein in Daba Shan foreland structure zone						
序号	样品编号	采样层位	$\delta^{13}\text{CPDB}$ (‰)	$\delta^{18}\text{OPDB}$ (‰)	$\delta^{18}\text{OSMOW}$ (‰)	成岩温度(℃)
1	DLD003-BT1	寒武系	2.4	-11.4	19.2	82.9
2	DLD003-BT2	寒武系	2.1	-11.2	19.3	82.2
3	DLD005-BT1	震旦系	-0.1	-18.7	11.6	140.6
4	DLD006-BT1	寒武系	-2.4	-11.7	18.8	85.6
5	DLD006-BT2	寒武系	-2.8	-10.9	19.6	80.2
6	DLD006-BT3	寒武系	-2.8	-11.2	19.3	82.2
7	DLD006-BT4	寒武系	-2.6	-11.3	19.2	82.9
8	DLD006-BT5	寒武系	-2.9	-11.9	18.6	87
9	DLD006-BT6	寒武系	-2.9	-11.2	19.4	81.5
10	DLD006-BT7	寒武系	-2.8	-11.4	19.2	82.9
11	DLD007-BT1	寒武系	1.8	-11.6	18.9	84.9
12	DLD007-BT2	寒武系	1.6	-11.7	18.8	85.6
13	DLD007-BT3	寒武系	1.7	-12	18.5	87.7
14	DLD007-BT4	寒武系	1.5	-11.6	18.9	84.9
15	DLD008-BT1	寒武系	1	-10.4	20.1	76.8
16	DLD008-BT2	寒武系	1	-9.8	20.8	72.2
17	DLD008-BT3	寒武系	0.8	-10.2	20.4	74.8
18	DLD008-BT4	寒武系	0.6	-10.2	20.4	74.8
19	DLD009-BT1	寒武系	2.4	-11.7	18.9	84.9
20	DLD009-BT2	寒武系	2.1	-11.7	18.8	85.6
21	DLD009-BT3	寒武系	1.9	-11.5	19.1	83.5
22	DLD012-BT1	寒武系	-7.9	-15.5	14.9	114.1
23	DLD012-BT2	寒武系	-7.7	-15.7	14.7	115.6
24	DLD013-BT1	奥陶系	0.8	-8.3	22.3	62.7
25	DLD013-BT2	奥陶系	0.5	-8.7	21.9	65.2
26	DLD015-BT1	寒武系	-1.1	-11.6	18.9	84.9
27	DLD016-1-BT1	寒武系	-1.9	-10.3	20.3	75.5
28	DLD016-1-BT2	寒武系	-2.1	-10.4	20.2	76.1

两相包裹体为主,可见少量纯液相包裹体,偶见纯气相包裹体;其中城口断裂处包裹体(DLD004)还可

见少量富气相的气液两相包裹体。气液比介于 5%~30%之间。

3.3 包裹体成分

本文针对断裂带方解石脉薄片中的单个包裹体运用显微激光拉曼光谱方法,获取包裹体的物质成分(如图 4)。结果表明,南大巴山前陆冲褶带的断裂包裹体为以气态烃+盐水的气液两相为主的烃类有机包裹体,气相成分为 CH₄,液相成分为 H₂O。通常情况下,有机质热演化程度越高,包裹体中 CH₄ 含量增加,至高一过成熟阶段,其含量可达 90%以上(Shi Jixi et al.,1987)。本文包裹体气相成分均为 CH₄,表明有机质的热演化程度达到高一过成熟阶段,有机质已分化成 CH₄,因此构造的圈闭性对天然气的保存尤为关键。城口断裂(DLD004)包裹体气相成分为 CH₄、N₂、H₂O,表明包裹体在被捕获时加入了大气中的 N₂,表明该断裂的开启性较强。城口断裂以南的 DLD003 处除气液两相包裹体外,还可见纯气态烃包裹体,前者代表早期液态烃的形成与运移,后者则是记录了天然气运移聚集过程。总之,南大巴山前陆冲褶带受构造运动的改造,断裂曾是有机流体或天然气运移、聚集的主要通道。

3.4 包裹体测温

均一温度反映的是矿物捕获流体时的温度,代表流体包裹体形成时流体的地质环境条件和温度条件(Lu Huanzhang,2004;Huang Shaohua et al.,2016)。表 2 所示为南大巴山前陆构造带包裹体均一温度与盐度统计表。数据显示,城口断裂处的包裹体(DLD004-BT1)均一温度最高,峰值温度区间

表 2 大巴山前陆构造带断裂脉体包裹体均一温度、盐度统计表

Table 2 The homogenization temperature and salinity statistics of fluid inclusions of Daba Shan foreland structure zone										
薄片	构造位置	赋存矿物	大小(μm)	测温数据			测盐数据			
				数量	均一温度(℃)	平均值(℃)	数量	冰点(℃)	盐度(%NaCl)	平均值(%)
DLD001-BT1	Ⅱ ₁	方解石	2~10	7	95~210	157.6	7	-2~-0.3	0.53~3.39	1.84
DLD002-BT1	Ⅱ ₃	石英	2~18	15	143~215	169.8	9	-1.8~-0.1	0.18~3.06	1.51
DLD003-BT2	Ⅱ ₁	方解石	2~7	13	175~295	230	19	-5~-0.5	0.88~6.45	4.43
DLD004-BT1	F	石英	2~13	19	247~415	326.8	13	-3.2~-4.5	5.26~7.17	6.11
DLD007-BT2	Ⅱ ₁	方解石	2~10	22	220~368	280.3	21	-6.3~-3.5	5.71~9.6	8.6
DLD007-BT3	Ⅱ ₁	方解石	2~7	21	123~306	211.8	21	-6.2~-1	1.74~9.47	6.83
DLD007-BT4	Ⅱ ₁	方解石	1~10	23	173~330	258.2	23	-7~-2	3.39~10.49	7.59
DLD009-BT2	I	方解石	1.5~10	26	140~351	245	25	-5~-0.8	1.4~7.86	5.91
DLD013-BT2	Ⅱ ₂	方解石	1~7	13	124~380	213.1	13	-5.3~-0.5	0.88~8.28	5.32
DLD015-BT1	I	方解石	2~10	22	125~265	141.2	17	-2.2~-0.3	0.53~3.71	1.73
DLD016-BT1	I	方解石	2~10	21	120~267	192.6	21	-4~-0.3	0.53~6.45	2.03
DLD039-BT1	Ⅱ ₃	方解石	≤1	11	93~171	146	11	-7.3~-1	1.74~10.86	4.67

注: I. 大巴山逆冲推覆带; F. 城口断裂; Ⅱ₁. 叠瓦断层带; Ⅱ₂. 断层一褶皱带; Ⅱ₃. 滑脱褶皱带。

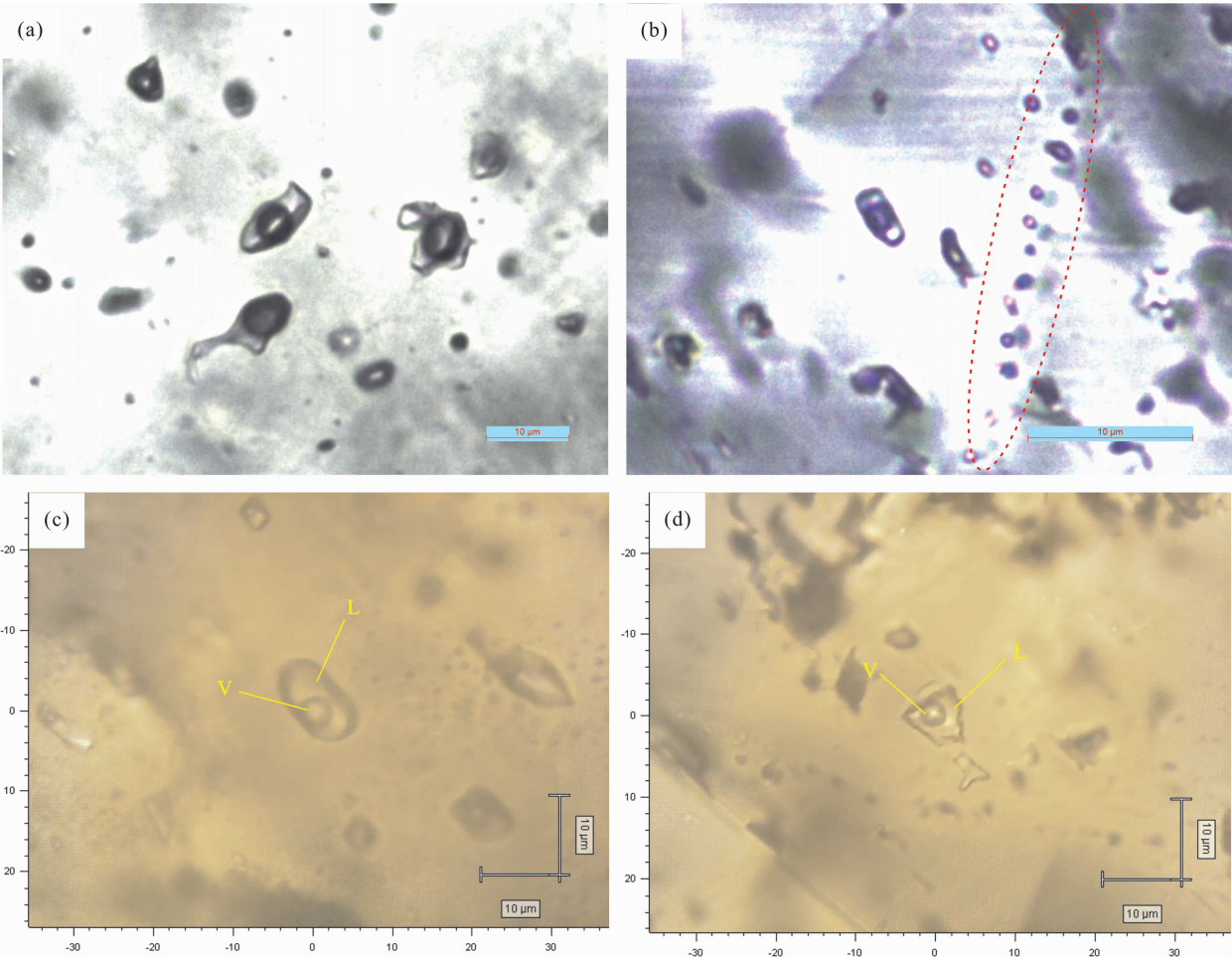


图 3 包裹体形态及分布特征

Fig. 3 The morphology and distributive characteristics of inclusions

(a)—包裹体呈独立分布;(b)—少量成串分布的包裹体;(c)—椭圆形包裹;(d)—不规则形态的包裹体
(a)—independent distribution of inclusions;(b)—a small amount of string distribution of inclusions;
(c)—elliptic inclusion;(d)—irregular shape of inclusions

为 311~336℃,峰值为 328℃。以城口断裂向前陆带方向,即构造变形程度逐渐减弱的方向,叠瓦断层带(Ⅱ₁)断裂包裹体均一温度峰值区间介于 183~269℃之间,频率峰值均一温度为 230℃,较城口断裂有所降低;而位于断裂—褶皱带的均一温度峰值为 213℃,滑脱褶皱带的均一温度峰值为 170℃。同样,位于城口断裂以北的大巴山逆冲推覆带内的样品,其均一温度介于 141~245℃之间,表现为越靠近城口断裂,其热演化程度越高的走势。盐度主要为 4.43%~8.6%NaCl,少量样品(均来自城口断裂以北)盐度为 1.73%~2.03%NaCl,表现为明显的降低。

4 讨论

4.1 古流体形成的地质条件

包裹体均一温度是反映矿物捕获时的流体温

度,代表了其形成时的地质环境条件和温度条件(Lu Huanzhang,2004)。本文所测得的包裹体均一温度以城口断裂处最高(DLD004-BT1),频率峰值温度为 328℃,以城口断裂向前陆凹陷带方向,随着构造变形程度逐渐减弱,三个次级构造带包裹体均一温度呈递减变化;城口断裂以北则表现为向北递减的规律,表明城口断裂作为南北大巴山构造带的分界断裂,其热演化程度高,城口断裂往南向前陆盆地方向,其构造带流体的热演化程度逐渐降低。

据前人研究显示(Zhang Xiulian,1985),碳酸盐岩稳定同位素组成主要受成岩时水介质温度的控制,当两者处于平衡状态时, $\delta^{18}\text{O}$ 随温度升高而降低,而 $\delta^{13}\text{C}$ 受温度变化不明显。所以在盐度变化不大时, $\delta^{18}\text{O}$ 值可作为测定流体水介质的古温度的重要指标。本研究依据 Shackleton(1974)的经验公式

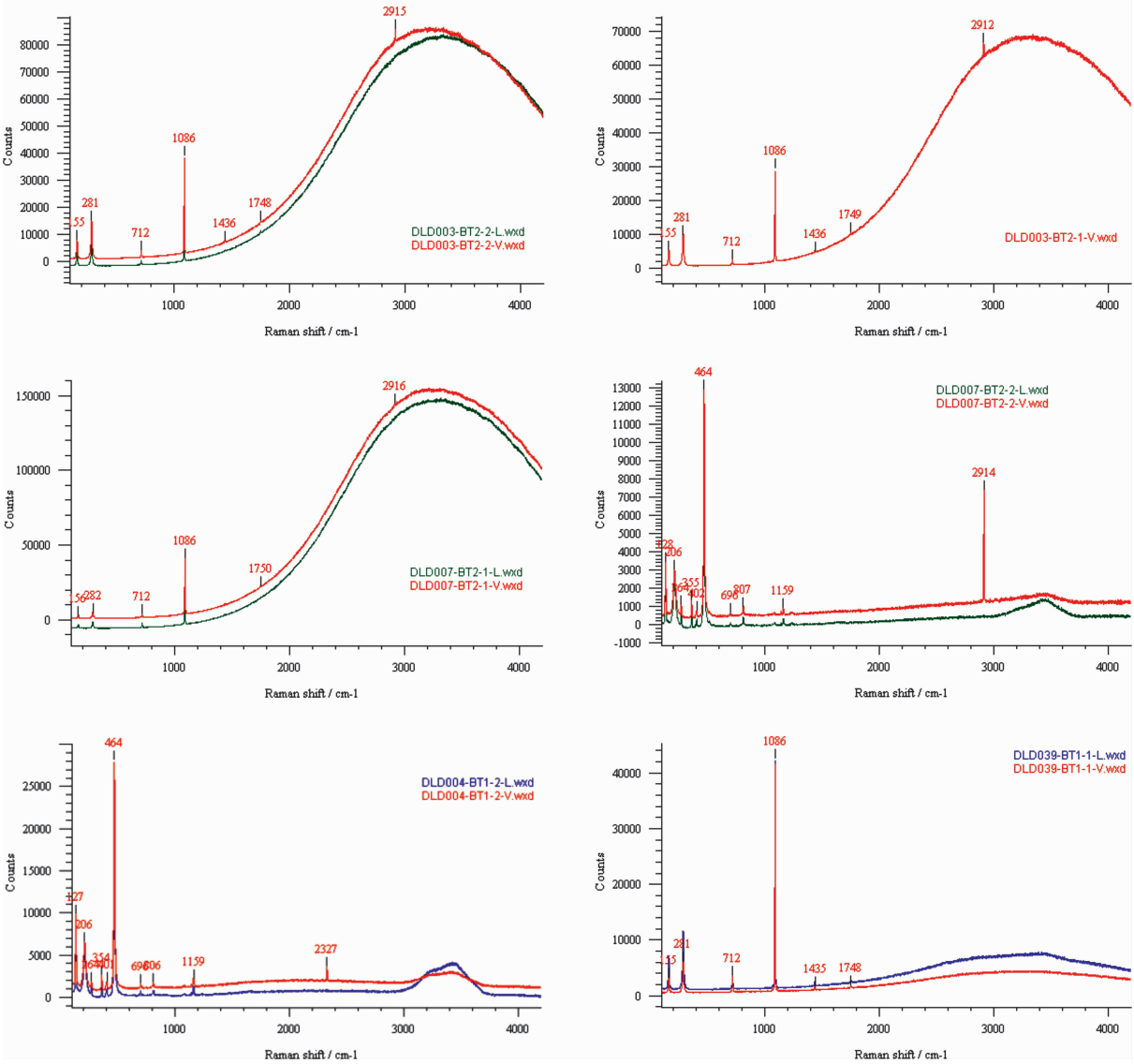


图 4 大巴山前陆构造带断裂流体的典型相态包裹体及其激光拉曼图谱

Fig. 4 Typical morphology and laser Raman spectrum of fracture fluid inclusions of Daba Shan foreland structure zone

$T = 16.9 - 4.38 \times (\delta C - \delta W) + 0.10 \times (\delta C - \delta W)^2$,
其中 $\delta C = 10.25 + 1.01025 \times \delta CaCO_3$, $\delta W = 41.2$
(设 $\delta H_2O = 0$), $\delta CaCO_3$ 为方解石样品的 $\delta^{18}O$ 值,求得方解石充填物形成时期的流体介质温度,即为成岩温度。经推算测得大巴山前陆构造带裂隙充填方解石脉的成岩温度为 $62.7 \sim 140.6^\circ C$,其温度值变化范围较大,大部分脉体的温度介于 $62.7 \sim 87.7^\circ C$ 区间,而点 DLD005 和 DLD012 推算的形成温度明显较高,分别为 $140.6^\circ C$ 和 $114.1 \sim 115.6^\circ C$,前者位于城口断裂附近,后者于坪坝断裂附近。结合前人数据分析(Xu Tianwu et al., 2009; Li Fei et al., 2014),城口断裂往盆地方向的古流体温度值逐渐降低。研究区整体上越靠近城口断裂,方解石脉的成岩温度逐渐升高,表明往山前带方向随着构造活动

的增强,构造断裂带中的流体更为活跃,持续时间更长,这可能会导致流体形成的深度和温度变化较大。此外,本文采用盐度—温度法推算古流体形成时的压力,城口断裂的古流体压力为 288MPa,往南叠瓦带古流体压力 224 MPa,断褶带为 181 MPa,滑脱带 113 MPa。结合前人数据(Yang Ling, 2011)分析,研究区古流体压力自北向南逐渐降低;这与上文分析的流体均一温度、演化程度、成岩温度等的变化规律是一致的。由此表明,在大巴山前陆褶皱—冲断带受北大巴向南逆冲推覆形成自北向南的主构造应力场这一背景下,由城口深大断裂形成的构造流体以构造带断裂为通道,朝着构造变形减弱的方向运移,这也验证了构造应力作为超高压流体向浅部排泄的主要动力(Li Rongxi et al., 2013),即流体在

主应力的驱动下,其沿构造挤压减弱的方向发生运移,流体的形成温度、热演化程度等均呈有规律地降低。

4.2 古流体来源

一般而言,断裂方解石脉的碳同位素基本不受成岩孔隙水的影响,在没有受到外来流体干扰的情况下,其组成比较稳定,可以反映脉体的成岩环境(Chen Daogong, 1994)。封闭环境下形成的脉体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 通常变化很小,而一旦有大气水下渗、有机质降解或有机碳热演化等,脉体的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值偏轻(Li Fei et al., 2014)。通常海相碳酸盐的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 为 $-4\text{‰} \sim -4\text{‰}$ (Wang Darui, 2000),所以从测得的碳同位素值分布情况来看,大部分样品的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 介于 $-2.9\text{‰} \sim -3.9\text{‰}$ 区间,属正常海相碳酸盐层的碳同位素值,表明流体来自围岩;而 DLD012-BT1、DLD012-BT2 样品的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 分别为 -7.9‰ 、 -7.7‰ ,相比于正常海相碳酸盐呈明显亏损,表明该断裂点流体具有外来流体混合的特征。据前人研究显示(Cai et al., 2002; Irwin et al., 1977),方解石的碳同位素组成由溶液中的 CO_3^{2-} 或 CO_2 决定,而有机成因的 CO_3^{2-} 或 CO_2 具有较低的碳同位素值,且该断裂点附近的包裹体盐度为正常值,并未显示有大气水下渗的特征,因而该断裂点碳同位素偏轻的原因应是与深部有机热液流体的上涌混入有关。

通过对比分析方解石脉与围岩的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值,方解石脉 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 较围岩轻且值变化范围大,同样反映部分流体具有外源特征。前人以 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}} = -10\text{‰}$ 作为碳酸盐矿物是否受到成岩蚀变影响的临界值,表 1 数据显示,方解石脉的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值不同程度的低于该临界值,反应其成岩过程或多或少受到淡水影响或有机流体的参与,而据包裹体的激光拉曼光谱分析显示,其气相成分为 CH_4 ,显然使 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值负偏多是由有机流体参与所致,这与前面的分析结果一致。根据 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 与 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 的相关关系(图 5),大巴山前陆构造带内方解石脉碳、氧同位素值大部分落于沉积碳酸盐域,表明这部分流体来源于围岩,或与围岩进行了充分的碳、氧同位素交换,使之达到了新的平衡,裂隙中方解石脉的碳、氧同位素值与围岩趋于一致。其中来自城口断裂和鸡鸣寺断裂的样品数据一部分落于沉积碳酸盐域,另一部分落于沉积碳酸盐域与地幔碳酸盐域之间的区域,表明具外部流体混合成因,这与碳、氧同位素分析的结果一致,数据可信度较高。

针对位于混合域的流体进行如图 6 的投点,其

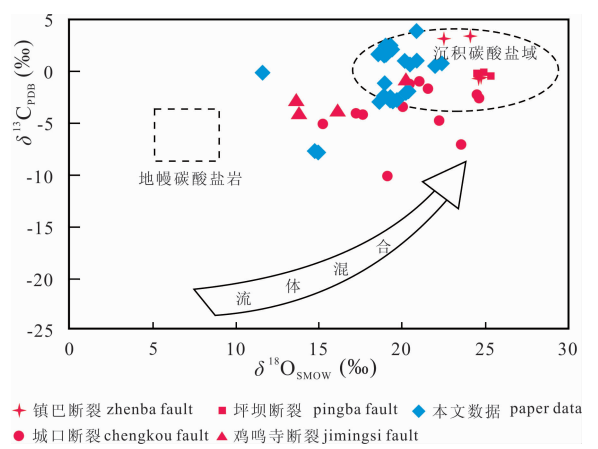


图 5 大巴山前陆冲褶带方解石脉 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 与 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 数值相关图(底图据 Jensenius et al., 1988; Dong Fuxiang et al., 2004 修改)

Fig. 5 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ and $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ correlogram of calcite veins of Dabashan foreland thrust-fold belts

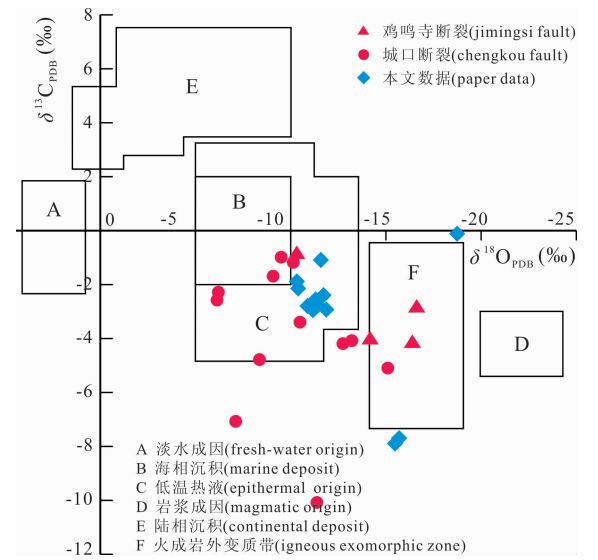


图 6 城口断裂和鸡鸣寺断裂方解石脉 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 与 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 相关关系图(底图据 Jensenius et al., 1988; Dong Fuxiang et al., 2004 修改)

Fig. 6 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ and $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ correlogram of calcite veins in Chengkou and Jimingsi fracture

落点大多位于低温热液碳酸盐域(C区),少量(DLD012)位于外变质带(F区)及两者之间的混合区域。其中位于坪坝断裂的DLD012样品,结合其流体包裹体均一温度分析,其具有 $370 \sim 380^\circ\text{C}$ 和 $130 \sim 160^\circ\text{C}$ 两期峰值区间,代表了两期油气运移和充注。前者均一温度与城口断裂的包裹体均一温度相近,应该指示与之有密切关联,可能为同期构造作用形成的流体充填;后者与滑脱褶皱带包裹体均一温度相近,可能与之同期,为晚期构造充填。综合分

析认为,位于 C 区的断裂流体具明显的外来流体混入的特征,根据上面的分析,该外来流体为沿通道上涌的深部有机流体;而据包裹体的均一温度显示还有一期具较低均一温度的流体运移,分析该期流体应与大气降水的渗入有关,即大气降水沿断裂下渗与地壳流体混合,形成的浅成低温热液。F 区样品则因区域上震旦统至下古生界地层因火山活动或岩浆侵入而导致浅变质,推测其与区域火山活动或岩浆侵入有关。

4.3 有机流体的演化程度与充注期次

包裹体的类型和特征反映其形成时的物理化学条件,因而结合气相成分可反应流体的热演化程度(Shi Jixi et al., 1987)。一般原油在未成熟或低成熟时,气相以 CO_2 、 H_2O 主,随着演化程度升高,气相 CH_4 含量增加,直至过成熟全部为 CH_4 ,演化达到生干气阶段(Shi Jixi et al., 1996)。本文包裹体粒径较小,形态不规则,分布不均匀,包裹体类型以富液相的气液两相包裹体为主,偶见纯气相或富气相的气液两相包裹体,气相成分为 CH_4 ,未检测出 CO_2 或其它烃类,表明有机质的演化已达到高一过成熟阶段。

研究区包裹体均一温度具有三组主要峰值(170°C 、 213°C 、 230°C),依据大巴山前陆构造带古生代生烃演化史(Li Rongxi et al., 2013),其相应的地质年龄分别为 290Ma、240~260Ma、180~190Ma,分别对应三次构造事件。从二叠纪到中三叠世,南大巴山为陆表海环境接受碳酸盐台地沉积,下古生界地层埋深不断加大,至晚三叠世寒武系烃源岩层埋深超过了 4000m,达到生烃高峰。印支运动中晚期,被夹持的秦岭微板块发生陆—陆碰撞而隆升成山,使南大巴山褶皱隆起形成一系列逆冲构造,其在加速烃源岩的演化和生排烃作用的同时,还形成构造圈闭或油气运移通道。早侏罗至晚白垩世(燕山期)发生的陆内造山运动,使大巴山由北向南扩展变形,使生烃停止并接受构造抬升变形的改造,南大巴山前陆构造带断裂流体多形成于该过程。从目前分析的数据显示,还有一部分均一温度在 100°C 左右,可能代表喜山期的流体充填作用,该构造事件使大巴山整体抬升,生烃作用基本停止,进一步对油气藏进行改造,只是在该改造阶段,下古生界的埋藏深度较大,可能受改造的程度相对有限。

4.4 断裂封存效应与页岩气构造藏

对于断层封闭性分析,存在定量和定性之分。前者运用断层封闭机理、影响因素等入手,后者运用

流体包裹体特征进行定性。研究表明,封闭条件下,地层内生流体盐度比开放体系下有外来流体混入的流体盐度要高,表生环境中的渗流带流体盐度是 0,正常海水沉积物中的流体盐度是 3.5%,二者混合流体的盐度为 0~3.5%;来自于沉积盆地的深部地层中含烃流体盐度一般要高于 3.5%。本文位于城口断裂与鸡鸣寺断裂之间的样品(DLD003-BT2~DLD013-BT2),其平均盐度值为 4.43%~8.6% NaCl,研究认为,大于海水盐度的有机流体均来源于盆地深部(Li Rongxi et al., 2013; Goldstein, 2001),这表明该区域的含烃流体具有深度特征,而上文对碳同位素的分析显示除 DLD012 之外的其它断裂的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值均具有正常海相碳酸盐层的特征,并未显示出明显的亏损,因此该区域的流体应为封闭环境下的深部地层流体。据 Yang Ling(2011)、Li Rongxi et al. (2013)的研究发现大巴山前陆构造带异常高压的存在,即大巴山推覆体前缘的前陆构造带以推覆断裂为顶板、志留系泥岩为底板的超高压封存箱。在构造应力的驱动下,流体沿断裂由深向浅部运移,封闭性较好的流体由于没有大气水下渗发生混合,因此该含烃流体既具有地层深部流体的特征,也具有其形成部位的正常海相地层流体的特征,说明该含烃流体是在封闭环境下由盆地深部流体与浅部地层流体混合而成。

坪坝断裂附近的 DLD012 的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 明显亏损,可能与深部有机热液上涌有关,该有机流体的热演化程度较高,已达生干气阶段,说明该断裂曾经是天然气运移的通道,因而后期构造对该通道的封存作用尤为关键。位于城巴断裂北侧的包裹体(DLD015-BT1、DLD016-BT1)和城口断裂以南的 DLD002-BT1、DLD001-BT1 盐度均小于 2%,均低于正常海相流体,反映因构造抬升作用而混入了表生流体,古流体运移体系的封闭性受到了破坏和改造。笔者根据上述低盐度包裹体的均一温度推算了其形成的深度,并进一步推算包裹体的形成时间约为 110Ma,捕获深度介于 3600~5000m 之间,而该时期大巴山地区正处于前陆盆地形成—萎缩的阶段,构造变形虽有加强,但断裂的下延深度经 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 推算不足 2000m,此时下古生界烃源岩的埋深约 3750m,因此这些断裂不足以对其构成破坏。

页岩气作为赋存于富有机质泥(页)岩及其夹层的非常规天然气,其形成和富集均与常规天然气藏有所区别。页岩气自身自储的特性,决定了其以吸

附气和游离气并存的特性,而在构造改造较强的地区,有机质热演化程度通常较高,常因裂缝比较发育而以游离气为主,所以构造的封闭性是决定该构造区页岩气富集的关键因素。综合研究认为,南大巴山构造带构造变形强度虽然较大,且构造带内的三条主干断裂在地质历史时期可能有过开启,但流体混入表层水的证据不足,这或许说明了其封存性较好;但可以确认的是,次级断裂中表生流体混入的证据较为明显,不过由于烃源岩层的埋深较大,断裂的下延深度有限,基本未能到达烃源岩层所在的部位,故而影响不大。更何况,位于前陆扩展带远端的滑脱褶皱带,其构造样式平缓、盖层连续,通常是油气成藏的有利场所。

5 结论

(1)城口断裂作为南北大巴山构造带的分界断裂,断裂带内的有机流体具有较高的热演化程度,古流体的形成温度和压力均最高,表明往山前带方向随着构造活动的增强,构造断裂带中的流体更为活跃,持续时间更长,导致流体形成的深度和温度变化较大。向南往前陆盆地方向,各构造带流体的热演化程度、形成温度、古流体压力也逐渐降低。

(2)南大巴山构造带构造变形强度虽然较大,构造带内的三条主干断裂在地质历史时期可能有过开启,但流体混入表层水的证据不足,这或许说明了其具有良好的封存性,而次级断裂则显示混入了表生流体,但由于烃源岩层的埋深较大,断层向下延伸的深度有限,不足以触及到烃源岩层,故次级断裂对下古生界烃源岩层的影响有限。综合研究认为,南大巴山前陆冲褶皱带存在局部的构造封闭区间,即便是断层比较发育的叠瓦断层带也可能存在相对的封闭空间,即断层封闭较好的断夹块构造(或称断片构造),其作为断层封存性较好的断下盘,具有有利的页岩气构造保存条件。这一认识目前在已完钻的渝参2井、城地1井得到了验证,这将进一步促进对南大巴山前陆构造带油气资源的新认识,对该构造带页岩气勘探开发具有一定的支撑指导意义。

致谢:野外工作得到了成都地质调查中心周小琳工程师、杨潇硕士的帮助;实验测试得到了国土资源部沉积盆地与油气资源重点实验室潘忠习老师的悉心指导;成文过程中万友利博士后与作者进行了有益的探讨;此外,审稿专家提出了诸多中肯的建议,在此一并致以诚挚的谢意。

References

- Cai C, Worden R H, Wang Q, Xiang T, Zhu J, Chu X. 2002. Chemical and isotopic evidence for secondary alteration of natural gases in the Hetianhe Field, Bachu Uplift of the Tarim Basin. *Organic Geochemistry*, 33(12): 1415~1427.
- Chen Daogong. 1994. *Geochemistry*. Hefei: University of Science & Technology China, the source of the community.
- Chegn Wanqiang, Yang Kunguang. 2009. Structural evolution of Dabashan Mountain: Evidence from ESR dating. *Earth Science Frontiers*, 16(3): 197~206.
- Cui Yuliang, Wang Genhou, Yao Yao, Liang Xiao. 2017. Polyphase deformation and fluid inclusion characteristic of pervasive syntectonic quartz veins in the mayer kangri indosinian accretionary complex, Tibet. *Acta Geologica Sinica*, 91(2): 384~399.
- Dong Fuxiang, Liu Li, Ma Yanping. 2004. Carbon and Oxygen isotopes of Calcite cement in the Lower Part of the Sha-1 Formation, the Dagang beach area. *Petroleum Geology & Experiment*, 26(6): 590~593.
- Dong Shuwen, Shi Wei, Zhang Yueqiao, Hu Jianmin, Zhang Zhongyi, Li Jianhua, Wu Hongling, Tian Mi, Chen Hong, Wu Guoli, Li Hailong. 2010. The Tectonic Stress Field in the Dabashan Orogen Resulting from Late Mesozoic Intra-Continental Orogeny. *Acta Geoscientica Sinica*, 31(6): 769~780.
- Dong Yunpeng, Zha Xianfeng, Fu Mingqing, Zhang Qian, Yang Zhao, Zhang Yan. 2008. Characteristics of the Dabashan fold-thrust nappe structure at the southern margin of the Qinling, China. *Geologica Bulletin of China*, 27(9): 1493~1508.
- Hu Jianmin, Dong Shuwen, Meng Qingren, Shi Wei, Chen Hong, Wu Guoli, Tian Mi. 2008. Structural deformation of the Gaochuan Terrane in the western Dabashan tectonic belt, China and its significance. *Geological Bulletin of China*, (12): 2031~2044.
- Huang Guangming, Wang Yuejun, Zhao Yonggang, Huangfu Pengpeng. 2016. Numerical Simulation of Structural Styles and Evolution of the Daba Shan Foreland Thrust Belt. *Acta Geologica Sinica*, 90(4): 653~668.
- Huang Shaohua, Qin Mingkuan, Liu Zhangyue, Mao Lihua, He Zhongbo, Xu Qiang. 2016. Fluid inclusion and organic geochemistry characteristics of uranium-bearing sandstone in the Lihuanggou area in the southern margin of Junggar Basin. *Acta Geologica Sinica*, 90(3): 475~488.
- Jensenius J, Buchardt B, Jørgensen N O, Pedersen S. 1988. Carbon and oxygen isotopic studies of the chalk reservoir in the skjold oilfield, danish north sea: Implications for diagenesis. *Chemical Geology Isotope Geoscience*, 73(2): 97~107.
- Li Fei, Shang Changjian, Lou Zhanghua, Zhu Zhenhong, Li Mei, Zhou Xiaoxing. 2014. Geochemical characteristics of paleofluid and hydrocarbon preservation in marine strata of Micang-Daba piedmont and its adjacent areas. *Oil & Gas Geology*, 35(3): 365

- ~371.
- Irwin H, Curtis C, Coleman M. 1977. Isotopic evidence for source of diagenetic carbonates formed during burial of organic-rich sediments. *Nature* 269, 209~213.
- Li Jinxi, Li Zhiwu, Liu Shugen, Deng Bin, Sun Dong, Tang Cong, Wu Wenhui. 2015. Analysis of Microtectonics in Deformed Rocks of Main Faults of Daba Acuate Orogenic Belts, China. *Geotectonica et Metallogenia*, 39(4): 587~600.
- Liu Dehan, Gong Se, Liu Dongying, Zeng Qinghui, Xiao Xianming, Tian Hui, Shen Jiagui, Li Xianqing. 2005. Investigation on the phases of organic inclusion from Gourong-Huangqiao region, Jiangsu Province, and its trapped temperature & pressure calculated by PVTsim modeling. *Acta Petrologica Sinica*, 21(5): 1435~1448.
- Liu Shu gen, Li Zhiwu, Liu Shun, et al. 2006. Formation and Evolution of Daba Mountain Foreland Basin and Fold-and-Thrust Belt, Sichuan, China. Beijing: Geological Publishing House.
- Li Rongxi, Dong Shuwen, Ding Lei, Shi Wei. 2013. Tectonically Driven Organic Fluid Flow in Dabashan Foreland Belt: Recorded by fibrous calcite veins contained hydrocarbon-bearing inclusions. *Acta Sedimentologica Sinica*, 31(3): 516~526.
- Li Zhiwu. 2006. Meso-Cenozoic evolution of Dabashan foreland basin-thrust belt, central China. Chengdu University of Technology.
- Li Zhiwu, Liu Shugen, Luo Yuhong, Liu Shun, Xu Guoqiang. 2006. Structural style and deformational mechanism of southern Dabashan Foreland Fold-Thrust Belt in central China. *Geotectonica et Metallogenia*, 30(3): 294~304.
- Lu Huanzhang. 2004. Fluid Inclusion. Beijing: Science Press.
- Luo Liang, Qi Jiafu, Zhang Mingzheng. 2015. Difference Study on Evolution and Deformation of the Fold-thrust Belts Surrounding Sichuan Basin. *Geological Review*, 61(3): 525~535.
- Ni Pei, Fan Hongrui, Ding Junying. 2014. Progressing Fluid Inclusions. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 33(1): 1~5.
- Ou Guangxi, Li Linqiang, Sun Yumei. 2006. Theory and Application of the Fluid Inclusion Reseach on the Sedimentary Basins. *Petrology and Geochemistry*, 25(1): 1~11.
- Pan Liyin, Ni Pei, Ou Guangxi, Li Linqiang. 2007. Multistage petroleum charges in the Silurian of Tazhong north slope of the Tarim basin, northwest China: evidence from fluid inclusions and organic geochemistry. *Acta Petrologica Sinica*, 23(1): 131~136.
- Shi Jixi, Fu Jiamo, Li Benchao, Jia Rongfen. 1987. Oil-gas assessment significance of inclusion from minerals in carbonate area. *Acta Sedimentologica Sinica*, 5(1): 86~93 (in Chinese with English abstract).
- Shi Jixi, Yu Xiaoyin. 1996. Characteristics of organic matter in carbonate rocks and unconventional evaluation of oil and gas. *Acta Mineralogical Sinica*, 16(2): 103~108.
- Goldstein R H. 2001. Fluid inclusions in sedimentary and diagenetic systems. *Lithos*, 55(1~4): 159~193.
- Wang Darui. 2000. Oil and gas stable isotope geochemistry. Beijing: Petroleum Industry Press.
- Wang Feiyu, Pang Xiongqi, Zeng Huasen, Shi Yulei, Hu Jianfeng, Liu Keyu. 2005. Paleo-Oil Leg Recognition and Its Application to Petroleum Exploration. *XingJiang Petroluem Geology*, 26(5): 107~111.
- Xu Tianwu, Zeng Jianhui, Zhang Yongwang, Zhang Zhongyi, Liu Yuxiang. 2009. Carbon and oxygen isotope features of carbonatite in the main fracture of Daba Mountains foreland structural belt and its fluid response. *Journal of China University of Petroleum*, 33(2): 34~39.
- Wang Jianqi, Yang Zhao, Dong Yunpeng, Liu Xiaoming, Li Wei. 2016. LA-ICP-MS zircon U-Pb Age and geochemistry of the Chengkou Volcanic Rocks, South Qinling: Implications for Neoproterozoic Evolution of the Northern Margin of Yangtze Block. *Geological Review*, 62(2): 491~501.
- Yang Ling. 2011. The Study on the characteristics of organic fluid and its migration in the Dabashan foreland structure. Xi'an: Chang'an University.
- Zeng Jianhui, Sun Zhanqiang, Xu Tianwu, Guo Kai. 2010. The Evolution of Paleo hydrodynam ics of Dabashan Foreland Thrust Belt and Its Influence on Formation and Preservation of Oil and Gas Reservoirs. *Geoscience*, 24(6): 1093~1101.
- Zhang Guowei, Meng Qingren, Yu Zaiping, Sun Yong, Zhou Dingwu, Guo Anlin. 1996. Geodynamics characteristics and orogeny in Qinling Orogen belt. *Science in China (Series D)*, 26(3): 193~200 (in chinese without English abstract).
- Zhang Nai, Wang Zhaoming, Yang Haijun, Xing Yongliang, Zhao Ruihua. 2010. The Stages and Significance of Ordovician Fluid Inclusions in Tazhong No. 1 Slope Break. *XingJiang Petroluem Geology*, 31(1): 22~25.
- Zhang Xiulian. 1985. Relationship between carbon and oxygen stable isotope in carbonate rocks and paleosalinity and paleotemperature of seawater. *Acta Sedimentologica Sinica*, 3(4): 17~30.
- Shackleton N J. 1974. Attainment of Isotopic Equilibrium Between Ocean Water and the Benthonic Foraminifera Genus *Uvigerina*: Isotopic Changes in the Ocean During the Last Glacial. *Colloques Internationaux Centre National De La Recherche Scientifique*, 219(302~209): 203~209.
- Zhang Yueqiao, Shi Wei, Li Jianhua, Wang Ruirui, Li Hailong, Dong Shuwen. 2010. Formation Mechanism of the Dabashan Foreland Arc-Shaped Structural belt. *Acta Geologica Sinica*, 84(9): 1300~1315.

参 考 文 献

- 陈道公. 1994. 地球化学. 合肥: 中国科学技术大学出版社.
- 程万强, 杨坤光. 2009. 大巴山构造演化的石英 ESR 年代学研究. *地质前缘*, 16(3): 197~206.
- 崔玉良, 王根厚, 姚尧, 梁晓. 2017. 西藏玛依岗日印支期增生杂岩透入性石英脉的变形期次及流体包裹体特征. *地质学报*, 91(2): 384~399.

董福湘, 刘立, 马艳萍. 2004. 大港滩海地区沙一段下部砂岩储层中方解石胶结物碳、氧同位素研究. 石油实验地质, 26(6): 590~593.

董树文, 施炜, 张岳桥, 胡健民, 张忠义, 李建华, 武红岭, 田蜜, 陈虹, 武国利, 李海龙. 2010. 大巴山晚中生代陆内造山构造应力场. 地球学报, 31(6): 769~780.

董云鹏, 查显峰, 付明庆, 张茜, 杨钊, 张燕. 2008. 秦岭南缘大巴山褶皱—冲断推覆构造的特征. 地质通报, 27(9): 1493~1508.

胡健民, 董树文, 孟庆任, 施炜, 陈虹, 武国利, 田蜜. 2008. 大巴山西段高川地体的构造变形特征及其意义. 地质通报, 27(12): 2031~2044.

黄光明, 王岳军, 赵勇刚, 皇甫鹏鹏. 2016. 大巴山前陆冲断带构造样式和演化过程的数值模拟. 地质学报, 90(4): 653~668.

黄少华, 秦明宽, 刘章月, 毛丽华, 何中波, 许强. 2016. 准噶尔盆地南缘硫磺沟地区铀矿化砂岩流体包裹体及有机地球化学特征. 地质学报, 90(3): 475~488.

李飞, 尚长健, 楼章华, 朱振宏, 李梅, 周孝鑫. 2014. 米仓—大巴山海相地层古流体地球化学特征与油气保存. 石油与天然气地质, 35(3): 365~371.

李金玺, 李智武, 刘树根, 邓宾, 孙东, 汤聪, 武文慧. 2015. 大巴山弧形构造带主要断裂带变形岩石显微组构分析及意义. 大地构造与成矿学, 39(4): 587~600.

刘德汉, 宫色, 刘东鹰, 曾庆辉, 肖贤明, 田辉, 申家贵, 李贤庆. 2005. 江苏句容—黄桥地区有机包裹体形成期次和捕获温度、压力的 PVTsim 模拟计算. 岩石学报, 21(5): 1435~1448.

刘树根. 2006. 大巴山前陆盆地—冲断带的形成演化. 北京: 地质出版社.

李荣西, 董树文, 丁磊, 施炜. 2013. 构造驱动大巴山前陆烃类流体排泄: 含烃包裹体纤维状方解石脉证据. 沉积学报, 31(3): 516~526.

李智武. 2006. 中—新生代大巴山前陆盆地—冲断带的形成演化. 成都理工大学.

李智武, 刘树根, 罗玉宏, 刘顺, 徐国强. 2006. 南大巴山前陆冲断带构造样式及变形机制分析. 大地构造与成矿学, 30(3): 294~304.

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.

卢焕章. 2004. 流体包裹体. 北京: 科学出版社.

倪培, 范宏瑞, 丁俊英. 2014. 流体包裹体研究进展. 矿物岩石地球化学通报, 33(1): 1~5.

欧光习, 李林强, 孙玉梅. 2006. 沉积盆地流体包裹体研究的理论与实践. 矿物岩石地球化学通报, 25(1): 1~11.

潘立银, 倪培, 欧光习, 李林强. 2007. 中国塔里木盆地塔中北坡志留系多期石油充注: 流体包裹体和有机地球化学证据. 岩石学报, 23(1): 131~136.

施继锡, 付家谟, 李本超, 贾蓉芬. 1987. 矿物包裹体在碳酸盐岩区油气评价中的意义. 沉积学报, 5(1): 89~96.

施继锡, 余孝颖. 1996. 碳酸盐岩中包裹体有机质特征与非常规油气评价. 矿物学报, 16(2): 103~108.

王大锐. 2000. 油气稳定同位素地球化学. 北京: 石油工业出版社.

王飞宇, 庞雄奇, 曾花森, 师玉雷, 胡剑峰, 刘可禹. 2005. 古油层识别技术及其在石油勘探中的应用. 新疆石油地质, 26(5): 107~111.

王建其, 杨钊, 董云鹏, 柳小明, 李玮. 2016. 南秦岭城口火山岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年和地球化学研究. 地质论评, 62(2): 491~501.

徐田武, 曾溅辉, 张永旺, 张忠义, 刘玉香. 2009. 大巴山前陆构造带主断裂碳酸盐岩碳、氧同位素特征及其对流体的响应. 中国石油大学学报(自然科学版), 33(2): 34~39.

杨玲. 2011. 大巴山前陆构造有机流体及其运移特征研究. 西安: 长安大学.

曾溅辉, 孙占强, 徐田武, 郭凯. 2010. 大巴山前陆冲断带古水动力演化阶段及其对油气藏形成和保存的影响. 现代地质, 24(6): 1093~1101.

张国伟, 孟庆任, 于在平, 孙勇, 周鼎武, 郭安林. 1996. 秦岭造山带的造山过程及其动力学特征. 中国科学(D辑: 地球科学), 26(3): 193~200.

张鼎, 王招明, 杨海军, 邢永亮, 赵瑞华. 2010. 塔中 I 号坡折带奥陶系流体包裹体期次及地质意义. 新疆石油地质, 31(1): 22~25.

张秀莲. 1985. 碳酸盐岩中氧、碳稳定同位素与古盐度、古水温的关系. 沉积学报, 3(4): 17~30.

张岳桥, 施炜, 李建华, 王瑞瑞, 李海龙, 董树文. 2010. 大巴山前陆弧形构造带形成机理分析. 地质学报, 84(9): 1300~1315.

Geochemical Characteristics of Fracture Fluids in the Foreland Thrust-Fold Belt in South Dabashan and Structural Preservation Analysis

ZHOU Yexin^{1,2,3)}, DING Jun²⁾, YU Qian^{2,3)}, WANG Jian^{2,3)}, XIONG Guoqing^{2,3)},
MEN Yupeng^{2,3)}, XIONG Xiaohui^{2,3)}, DENG Qi^{2,3)}

1) *College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu, 610059, China;*

2) *Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu, 610081, China;*

3) *Key Laboratory of Sedimentary Basin and Oil and Gas Resources,
Ministry of Land and Resources PRC, Chengdu, 610081, China*

Abstract

The foreland thrust-fold belt in south Dabashan is located between Chengkou fracture and Tiexi-Wuxi buried fracture. To study the influence of tectonic activity on the hydrocarbon migration and preservation of shale gas, this study carried out analysis of C and O isotope for fluid inclusions from the Dabashan foreland structural belt. The results show that the distribution of the fluid carbon and oxygen isotope is more dispersed than that of surrounding rocks. And the $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ is distributed between -2.9% and 3.9% , which belongs to normal marine carbonate carbon layer. The liquid near the Pingba fault shows depleted in $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$, showing characteristic of foreign fluid mixing. The fluid inclusions consist of hydrocarbon-bearing gas and liquid two phases, with gas phase of CH_4 and liquid phase of H_2O . Homogenization temperature of vapor-liquid aqueous inclusions is the highest in that of fluids near the Chengkou fault, and range from 311°C to 336°C with a peak of 328°C . Southwardly, homogenization temperature is from 183°C to 269°C in the imbricated thrust zone with a peak of 230°C , has a peak of 213°C in the thrust-fold belt and 170°C in decollement fold belt, displaying a gradually decreasing trend toward the basin. Salinities of vapor-liquid aqueous inclusions are from 4.43% to 8.6% NaCl. The study shows that the Chengkou fracture, as a major fault dividing the north and the south boundary of the Dabashan tectonic belt, has high temperature and thermal evolution degree of the ancient fluid. The thermal evolution degree, rock-forming temperature and the ancient fluid pressure increase gradually from the basin northwards the Chengkou fracture, suggesting that with strengthening of the tectonic activity, fluids in the structural belt are more active and lasts longer, resulting in that depth and temperature of fluid vary greatly. The liquid in the structural belt was overall formed in a closed system. The deep hydrocarbon fluid driven by the main tectonic stress migrated along fractures up to the shallow part of the basin, and then mixed with the shallow formation fluid. However, some secondary fractures have the limited impact on fluid sealing because their forming time and insufficient depth can not reach the lower Paleozoic hydrocarbon source rock.

Key words: carbon and oxygen isotope; fluid inclusion; fault fluid; fault sealing; the southern Daba Shan foreland thrust-fold belts