

文章编号: 1000-0550(2013)03-0516-11

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^①

李荣西¹ 董树文² 丁磊³ 施炜²

(1. 长安大学 西部矿产资源与工程地质教育部重点实验室 西安 710054;
2. 中国地质科学院 北京 100037; 3. 陕西延长石油研究院 西安 710075)

摘要 含烃包裹体纤维状方解石脉被认为是超高压下油气流体形成和排泄的标志。大巴山前陆构造带一些断裂和下古生界黑色泥岩和泥灰岩烃源岩微裂隙中分布有含烃包裹体纤维状方解石脉,成分分析表明其为低镁方解石。纤维状方解石脉 $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$ 和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}$ 比围岩碳酸盐岩的明显变轻,前者 $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$ 和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}$ 变化范围分别为 $-1.9\% \sim -4.8\%$ 和 $-8.4\% \sim -12.8\%$,后者分别为 $-1.7\% \sim +3.1\%$ 和 $-8.7\% \sim -4.5\%$,且 $\delta^{13}\text{C}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 具有明显的线性关系,反映出纤维状方解石脉具有成岩有机流体与浅部流体混合的流体特征。纤维状方解石脉含有共生的固体沥青包裹体、含甲烷液相包裹体和气液二相盐水包裹体等多相态包裹体,其中沥青包裹体为油气运移的残余沥青。气液二相盐水包裹体均一温度主要位于 140°C 和 196°C 之间(峰值为 179°C),盐度较高(平均为 $9.7\text{wt}\%$ NaCl)。分别应用盐水包裹体和甲烷包裹体等溶线 $P-T$ 相图确定出含烃包裹体纤维状方解石脉形成的流体压力为 $150 \sim 200 \text{ MPa}$,属于异常超高压流体。地质和地球化学特征分析认为,大巴山含烃包裹体纤维状方解石脉不具有泥岩因压实成岩作用而形成的超高压流体特征。结合沉积和构造演化历史分析认为,印支碰撞造山运动和燕山前陆构造作用导致大巴山褶皱隆起并伴随天然气藏破坏和改造,挤压环境下的超高压构造应力驱动天然气流体排泄,大巴山前陆构造带含烃包裹体纤维状方解石脉就是超高压构造应力驱动天然气排泄的产物。

关键词 纤维状方解石脉 包裹体 超高压流体 流体排泄 大巴山构造带

第一作者简介 李荣西 男 1966年出生 博士 教授 油气地质与勘探 E-mail: rongxi99@163.com

中图分类号 TE122.1 **文献标志码** A

0 前言

天然产出的方解石一般为菱形,常见菱面体或三方偏三角面体晶体形态。但是在一些沉积盆地和造山带富含有机质的黑色泥岩、页岩和泥灰岩等低渗透性岩石裂隙中可见到纤维状方解石脉,其方解石晶体长与宽之比一般大于10,且彼此平行生长^[1~3]。成岩作用、同位素及流体包裹体等研究表明,纤维状方解石生长特征不受晶体结晶习性和矿物生长理论限制,其产出代表了一种特殊来源的地质流体并反映其形成于特定地质条件下^[3~14]。大量研究表明,含烃包裹体的纤维状方解石脉就是超高压下油气有机流体形成和排泄的标型矿物^[13~18]。

纤维状方解石脉在沉积盆地泥岩烃源岩中最常见,目前普遍认为其形成与泥岩超高压流体排泄有关^[15~18],认为当泥岩等低渗透性岩石在中浅埋藏阶段,在压实成岩作用下形成的成岩流体无法及时排

出,出现孔隙流体压力高于其对应静水压力的异常高压现象,泥岩孔隙流体产生了所谓的剩余压力,随压实成岩作用加强,孔隙流体剩余压力积聚到超过泥岩破裂压力时就会产生裂隙,超高压孔隙流体沿裂隙排出即形成了纤维状方解石脉^[1,3,19]。沉积盆地泥岩压实成岩流体主要源自于蒙脱石向伊利石转化过程中的脱水作用,其转化温度与烃源岩油气形成温度基本一致,因此,烃源岩超高压成岩流体和生烃油气有机流体实际上同时形成并一起沿裂隙排出,这样就形成了含油气盆地中常见的含烃包裹体的纤维状方解石脉^[13]。因此,长期以来,人们就将含烃包裹体的纤维状方解石脉作为含油气盆地油气超高压排烃和运移的标志,也将其作为烃源岩生烃和油气初次运移的主要证据^[13,17~20]。

近年来研究人员发现造山带也发育纤维状方解石脉,研究认为造山带纤维状方解石脉是同构造期地质流体在超高压构造应力作用下排泄产物^[2,21~23]。

①国家自然科学基金项目(批准号:40173005)和中国地质调查局地勘项目(编号1212011121117,1212011121095)资助
收稿日期:2012-09-08;收修改稿日期:2012-09-21

通过对造山带纤维状方解石脉碳、氧同位素、变形特征及流体包裹体压力恢复等研究, 认为纤维状方解石脉作为同构造期地质流体, 完整地记录了造山带超高压流体(压力高达 300 MPa) 在褶皱推覆隆升期间的排泄过程^[21~25]。对聚合构造环境中同构造变形方解石脉及其流体包裹体研究, 揭示了挤压变形过程中流体在构造应力驱动下沿断裂系统自深部向浅部的排泄过程^[24~29]。由此可见, 强烈变形构造环境中发育

的纤维状方解石脉及其中流体包裹体记录了同构造期变形过程及流体排泄特征。

大巴山前陆构造带发育大量方解石脉, 其中多处见到含烃包裹体纤维状方解石脉, 本文通过对含烃包裹体纤维状方解石脉及其流体包裹体研究表明, 它不具有泥岩压实成岩阶段超高压油气流体特征, 而是在印支碰撞造山作用和燕山前陆构造运动期间, 大巴山构造带褶皱隆起并导致天然气藏破坏, 含烃包裹体纤

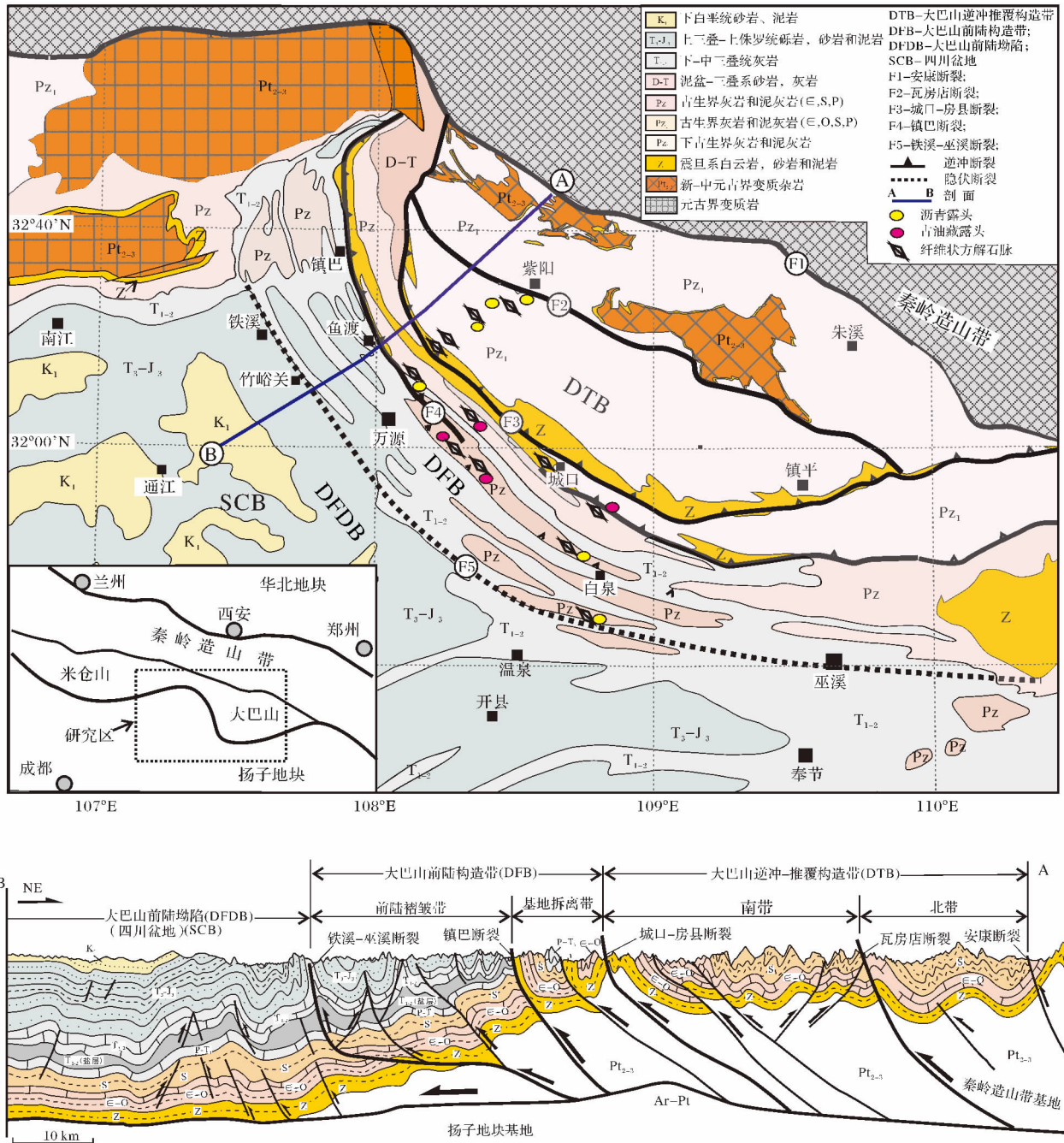


图1 大巴山前陆构造带及纤维状方解石脉分布图(据 Shi Wei 等 2012, 修改)

Fig. 1 Structural sketch and fibrous calcite veins distribution in Dabashan Foreland belt(after Shi Wei , et al. , 2012)

纤维状方解石脉就是超高压构造应力驱动天然气排泄的产物。

1 区域地质背景

大巴山前陆构造位于秦岭构造带中段南侧,地处秦岭造山带与扬子地块之间,其北以安康断裂与秦岭造山带为界,为一个向西南凸出的弧形构造带(图1)。大巴山前陆构造自北而南分为三大次级构造单元,以城口—房县断裂为界,其北为大巴山冲断—推覆构造带,其南为大巴山前陆构造带,而巫溪—铁溪隐伏断裂以南的四川盆地区为大巴山前陆拗陷。近年来研究表明,大巴山前陆构造是叠加在三叠纪构造带之上的一个晚侏罗纪前陆构造^[30-33],这个弧形的山脉构成晚侏罗纪—早白垩纪的大巴山陆内造山带的前陆构造带,是四川盆地东北部一个潜在的重要含油气聚集构造带^[31,33]。所以,文中所述的大巴山前陆构造带均指晚侏罗纪形成的弧形褶皱带—冲断带,城口—房县断裂以北的大巴山冲断—推覆构造带出露巨厚的下古生界地层,城口—房县断裂和镇巴断裂之间为前陆的基底拆离带,区域主拆离带出露地表,地层以震旦系和寒武系为主;镇巴断裂和铁溪—巫溪断裂之间为前陆褶皱带,由侏罗系组成紧密向斜的核部;铁溪—巫溪断裂以西为前陆拗陷带,出露白垩系红层(图1)。

沉积学和石油地质研究成果表明^[35,36],早古生代时期,大巴山地区与四川盆地同属扬子地块,早古

生界沉积特征一致并可以进行对比。与四川盆地一样,大巴山前陆构造带存在上、下两套生储盖组合,下组合以下古生界海相碳酸盐岩和碳质泥岩为烃源岩,以下寒武统白云岩和中上寒武统鲕粒灰岩及奥陶系灰岩为储层,以志留系泥质岩为盖层;上组合以下二叠统栖霞组及上二叠统吴家坪组海相碳酸盐岩为烃源岩,上二叠统和下三叠统白云质鲕粒灰岩和生物礁灰岩为储层,以嘉陵江组—雷口坡组膏盐岩层及泥灰岩层为区域性盖层。该组合是目前川东北地区最主要的油气生储盖组合,也是大巴山前陆构造油气勘探的重点。

2 样品与实验分析测试

含烃包裹体纤维状方解石脉主要见于大巴山前陆构造带下寒武统和下志留统龙马溪组碳质泥岩或黑色页岩和泥灰岩微裂隙中,这套富含有机质的黑色岩系在扬子地块广泛分布,被认为是华南地区重要的烃源岩^[36]。其次,在麻柳坝断裂(城口—房县断裂)、鹿池坝断裂(白果—坪坝断裂)和镇巴断裂等断裂带及其两侧地层岩石裂隙中也见含烃包裹体纤维状方解石脉,其分布空间与古油藏和沥青关系密切(图1)。含烃包裹体的纤维状方解石脉多呈楔状形态,单个脉体很小,宽度多为2~5 mm,长度一般为3~7 cm,野外很难注意到。手标本具有乳白色光泽,用肉眼仔细观察可以识别出方解石彼此平行、并垂直裂隙壁呈一向延长状生长(图2a)。

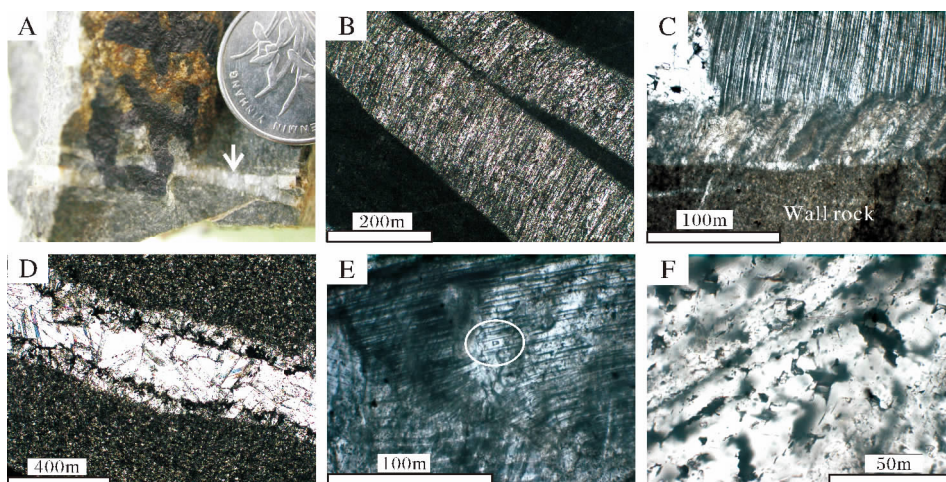


图2 大巴山前陆构造带含烃纤维状方解石脉特征

A. 下寒武统暗色泥灰岩中含烃包裹体纤维状方解石脉,箭头所指,紫阳县毛坝关乡; B. 下志留统暗色泥岩中纤维状方解石脉(+),紫阳县麻柳坝乡; C. 下寒武统暗色泥灰岩中含烃包裹体纤维状方解石脉分带现象(+),紫阳县毛坝关乡; D. 麻柳坝断裂带方解石脉分带及其固体沥青包裹体(-),紫阳县麻柳坝乡; E. 纤维状方解石脉中流体包裹体(-),荆竹坝乡; F. 方解石脉中多相态流体包裹体(-),坪坝乡。

Fig. 2 Photomicrograph of fibrous calcite veins in Dabashan Foreland belt

本次对采集的样品分别制作标准岩石薄片和包裹体薄片,在偏光显微镜下对方解石脉及其中包裹体进行岩相学观察,应用 JXA-8100 型电子探针对纤维状方解石脉及其对应的围岩方解石化学成分进行分析对比。用激光拉曼光谱分析纤维状方解石脉,获得其拉曼光谱图。用 Microdrill 微区取样仪钻取纤维状方解石及其围岩方解石用于碳、氧同位素分析,分析前用浓度为 1% 的次氯酸钠溶液处理样品以防有机污染,再应用 100% 磷酸法分析方解石脉的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$,分析结果用 ‰PDB 标准表示,精度为 0.1‰。应用显微傅里叶红外光谱仪(Micro-RT. IR)原位分析沥青化学成分特征,应用 Linkam THMS600 型冷热台分析流体包裹体均一温度、冰点温度等参数,以确定流体盐度、流体密度和压力等参数,温度测量误差为 0.1℃。

3 实验结果与分析

3.1 纤维状含烃方解石脉岩相学特征

显微镜下观察表明,含烃包裹体纤维状方解石脉主要充填分布在富含有机质的低渗透性黑色泥岩、页岩和泥灰岩微小裂隙中(图 2A),方解石晶体呈纤维状或毛发状集合体从裂隙两侧向中心对称且彼此平行生长(图 2B,C),纤维状方解石单晶体一般宽度 0.2~0.6 mm,长度一般不超过 6 mm。部分方解石呈尖刀状形态垂直裂隙壁生长,但方解石发生破碎,可见压力影和变形双晶现象,表明其经历过剪切变形作用(图 2D)。含烃类包裹体的纤维状方解石脉可见分带现象(图 2D),可以识别出三种分带类型:(1)靠近裂隙两侧围岩为纤维状方解石,中间为镶嵌状方解石晶体;或者与之相反,即靠近裂隙两侧围岩的为镶嵌状方解石晶体,中间的为纤维状方解石;(2)靠近裂隙两侧围岩的纤维状方解石和中间的纤维状方解石定向不同,二者斜交,边部纤维状方解石可以近于垂直围岩壁向内生长,也可以斜交(图 2C);(3)靠近裂隙两侧围岩的镶嵌状方解石颗粒中夹有围岩的微细岩屑,中间的为纤维状方解石。含烃包裹体纤维状方解石脉分带现象表明,岩石裂隙出现过多次开启和闭合现象^[13,19]。

含烃包裹体纤维状方解石脉中烃类包裹体类型多样,包括固体沥青包裹体,含烃液相包裹体和气液二相盐水包裹体,从产状判断这些包裹体均为共生的原生不混溶流体包裹体。另外,在大巴山前陆构造带的一些断裂带见到大量沥青脉体和古油藏沥青(图

1)。烃源岩裂隙和断裂带被公认为油气排泄和运移的重要通道,大巴山前陆构造带广泛分布的含烃包裹体纤维状方解石脉和沥青,表明大巴山前陆构造带发生过大规模的油气有机流体排泄和运移过程。

3.2 含烃包裹体纤维状方解石脉成分特征

根据已有的研究报道,沉积盆地中纤维状矿物脉体有方解石和白云石等碳酸盐脉以及石膏和硬石膏等硫酸盐脉,其中纤维状方解石脉最为常见^[2,3,5]。本次用电子探针分析了 12 个含烃包裹体纤维状方解石脉及其对应的围岩中方解石的化学成分,结果发现含烃包裹体纤维状方解石脉均为低镁方解石,其 MgO 含量最高为 0.51 wt%,平均为 0.31 wt%;FeO 含量变化较大,最低低于检测限,最高为 1.67 wt%,平均为 1.29 wt%;MnO 含量平均为 0.14 wt%。而与纤维状方解石脉对应的围岩方解石相对富含 MgO,纤维状方解石脉样品围岩方解石 MgO 最低为 1.81 wt%,最高为 8.97 wt%,平均为 4.34 wt%。许多分析研究表明,低镁方解石多为后期成岩自生矿物,而非原始海水沉积矿物,而且纤维状方解石脉一般都为低镁方解石^[4,9,37,38]。由此可见,大巴山纤维状方解石脉为后期成岩矿物脉体。

偏光显微镜下纤维状方解石的形态和光性特征与低温热液作用形成的纤维状或茅状文石非常相似,文石与方解石为类质同象,二者化学成分也完全一样。但是,文石与方解石的拉曼光谱差别较大,方解石具有 280 cm^{-1} ,712 cm^{-1} ,1075 cm^{-1} 等三个特征的拉曼光谱吸收峰,而文石的激光拉曼光谱图复杂的多,最大区分处就是 712 cm^{-1} 峰分化成 706 cm^{-1} ,701 cm^{-1} ,694 cm^{-1} 三个峰^[39]。图 3 为大巴山含沥青纤维状方解石脉激光拉曼光谱图,可以看出其图谱特征与正常方解石完全一样,因此,可以确定其为纤维状方解石。

3.3 纤维状方解石脉包裹体特征

显微镜下观察发现,大巴山前陆构造带纤维状方解石脉含有丰富的烃类包裹体,主要为固体沥青包裹体,含烃液态包裹体和气液二相盐水包裹体。沥青包裹体呈具流动状结构的非常细的条纹状,或呈形态边缘不规则的微小碎片状。具分带现象的纤维状方解石脉中的沥青包裹体多处于纤维状方解石和颗粒状方解石之间,也可以被镶嵌状方解石颗粒包裹,表明沥青与方解石脉体均为裂隙同期充填物。沥青在透射白光单偏镜下呈黑色,在反射荧光(紫外光)照射下不发荧光,在油浸反射白光下呈灰色或灰白色,均

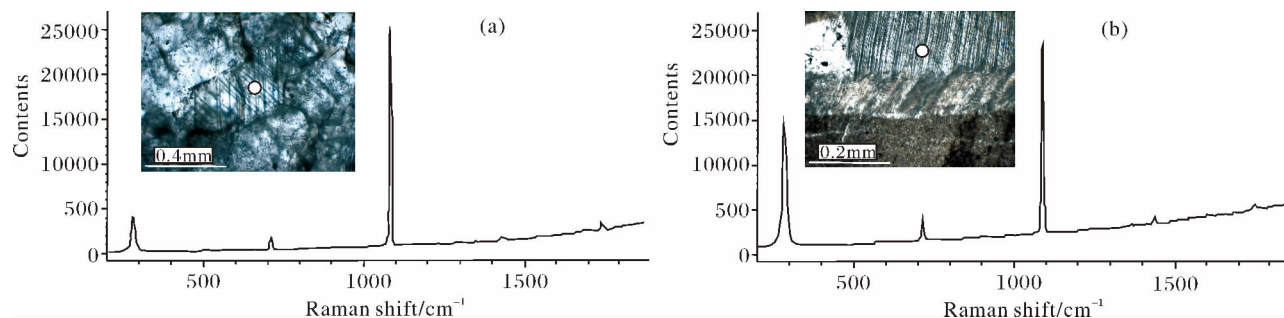


图3 纤维状方解石脉激光拉曼光谱图

Fig. 3 Laser Raman spectrum of fibrous calcite veins

右图: 纤维状方解石; 左图: 正常方解石

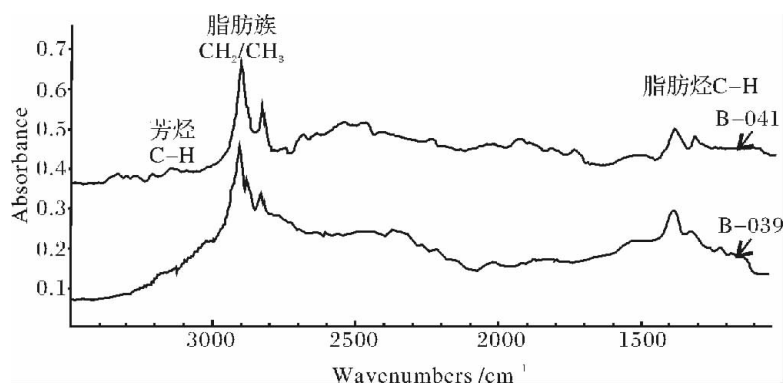


图4 固体沥青 Micro-RT. IR 光谱图

(B-041: 纤维状方解石脉中固体沥青包裹体; B-039: 断裂带中沥青脉)

Fig. 4 Micro-RT. IR spectrum of solid bitumen

(B-041: bitumen contained inside of fibrous calcite vein; B-039: bitumen vein filled in fault)

质光性特征。测量的沥青最大反射率 (R_{bmax}) 在 1.75% ~ 2.64% 之间, 与围岩中沥青反射率基本一致, 表明其达到高过成熟的热演化程度。

应用显微傅里叶红外光谱仪 (Micro-RT. IR) 对纤维状方解石脉固体沥青包裹体 (B-041) 和断裂带沥青脉 (B-039) 化学结构进行分析, 从红外光谱图 (图4) 可以看出, 二者红外光谱特征相似, 在波长 2800 ~ 3000 cm^{-1} 处的脂肪烃 CH_2/CH_3 官能团和在 1500 ~ 1300 cm^{-1} 处的脂肪烃 C-H 吸收峰非常明显, 而在波长 1600 cm^{-1} 处芳烃 C=C 官能团吸收峰和在 3045 cm^{-1} 处的芳烃 C-H 官能团吸收峰很弱, 表明两种产状的沥青化学成分中以饱和烃为主而芳烃相对较低, 显示出非热解沥青 (如油气运移形成的残余沥青、构造破坏的古油气藏沥青) 的特征^[40-41]。

纤维状方解石脉中含烃液态包裹体和气液二相盐水包裹体均无荧光, 普遍较小, 直径一般在 2 ~ 6 μm 之间, 最大可达 10 μm , 含烃液态包裹体颜色为不均匀的灰色, 多呈一向延伸的棒状、菱形等形态, 气液

二相盐水包裹体多为无色透明状, 具规则边角的菱形, 气/液比主要为 5% ~ 30%。激光拉曼光谱对包裹体成分分析表明, 纯液相包裹体中基本上都含有 CH_4 , CH_4 含量较高, 最高达到 21%, 气液二相包裹体主要成分为 H_2O , CH_4 含量一般小于 5%。多种相态包裹体同时存在, 表明它们属于共生的不混溶多相流体包裹体。

3.4 纤维状方解石脉形成温度压力条件分析

矿物流体包裹体记录了流体环境温压条件, 流体包裹体均一温度 (T_h)、盐度 (S) 和压力 (P) 之间存在密切关系, 对于某种成分的流体包裹体可以将其视为等组分的等容体系, 均一温度 (T_h) 记录了包裹体捕获的最低温度^[42-43]。盐水包裹体是各种地质环境中最常见的包裹体, Bodnar and Vityk (1994) 通过实验建立了盐水包裹体捕获温度 (T)、流体压力 (P)、盐度 (S) 和均一温度 (T_h) 之间的关系, 并绘制了标有不同盐度盐水溶液等容线的 $P-T$ 相图, 当测得盐水包裹体均一温度 (T_h) 和盐度 (S) 就可确定包裹体等容

线, 利用其他地质温度计确定包裹体捕获温度(即形成时环境温度, T), 在对应盐度的 $P-T$ 相图上就可以确定包裹体形成时的流体压力(P)^[43]。

本次测量的大巴山纤维状方解石脉中气液二相盐水包裹体冰点温度为 $-3.2^{\circ}\text{C} \sim -9.7^{\circ}\text{C}$, 对应的盐度为 $5.26\text{wt}\% \text{NaCl} \sim 13.62\text{wt}\% \text{NaCl}$ 之间, 平均为 $9.7\text{wt}\% \text{NaCl}$ 。测量的气液二相盐水包裹体均一温度主要位于 $140^{\circ}\text{C} \sim 196^{\circ}\text{C}$ 之间, 峰值为 179°C 。

因为包裹体均一温度受控于流体均一时的温度和压力, 要确定纤维状方解石脉包裹体形成的压力, 需要确定包裹体被包裹时的环境温度, 这个温度与流体均一无关。可以应用纤维状方解石脉中包裹的固体沥青包裹体确定其形成当时的温度。前面分析表明固体沥青包裹体与所在地层沥青反射率一致, 沥青反射率(R_b) 在 $1.75\% \sim 2.64\%$ 之间, 利用 Jacob 1985 年建立的沥青反射率与镜质体反射率关系式^[44] 和 Barker 1986 年建立的镜质体反射率与古温度关系^[45] 换算出沥青经历的最大古地温为 $192 \sim 240^{\circ}\text{C}$, 该温度代表了沥青经历的最高环境温度(T)。利用 Bodnar and Vityk 1994 年的方法^[46], 在其建立的对应盐度(选用 $10\text{wt}\% \text{NaCl}$) $P-T$ 相图(图 5a) 上确定出大巴山纤维状方解石脉中包裹体形成时流体压力范围大约为 $150 \sim 200 \text{MPa}$, 该压力也就是纤维状方解石脉形成时地层流体压力。

另外, 人们用大量实验也建立了含甲烷流体包裹

体盐度(S)、均一温度(T_h) 和流体压力(P) 之间关系相图, 通过测量含甲烷包裹体均一温度(T_h) 确定其流体密度(ρ) (图 5b), 结合包裹体捕获温度也可以确定其形成时流体压力^[47, 48] (图 5c)。本次对纤维状方解石脉中与气液二相盐水包裹体共生的含甲烷的纯液相包裹体测试表明, 当其冷冻到 -120°C 时出现气泡, 重新加热到 $-105^{\circ}\text{C} \sim -116^{\circ}\text{C}$ 时均一到液相, 表明纯液相包裹体中的溶解 CH_4 均达饱和。用 Angus 等 1976 年的方法^[47] 确定出含甲烷纯液相包裹体流体密度为 $0.31 \sim 0.34 \text{g}/\text{cm}^3$ 左右(图 5b)。应用前面沥青反射率方法确定的包裹体捕获温度($192 \sim 240^{\circ}\text{C}$) 在图 5c 确定出甲烷流体包裹体压力为 $150 \sim 190 \text{MPa}$ 。对比可以看出, 用该方法确定的流体压力与前面用盐水溶液等容线方法确定的流体压力基本一致。很显然, 与地层正常静水压力梯度相比, 大巴山前陆构造带纤维状方解石脉形成于异常超高压流体环境条件下。结合下面确定的古埋藏演化历史分析表明, 研究区古压力梯度超过 $2.0 \text{MPa}/100 \text{m}$ 左右。

许多研究人员对四川盆地现今地层压力进行分析研究^[49-51], 认为四川盆地普遍存在异常高压, 压力梯度最大超过 $2.0 \text{MPa}/100 \text{m}$ 。对比大巴山前陆构造带古流体压力梯度和四川盆地现今地层压力梯度可知, 大巴山前陆构造带存在超常异常古流体。

刘德汉等曾对四川盆地东北部普光气田包裹体

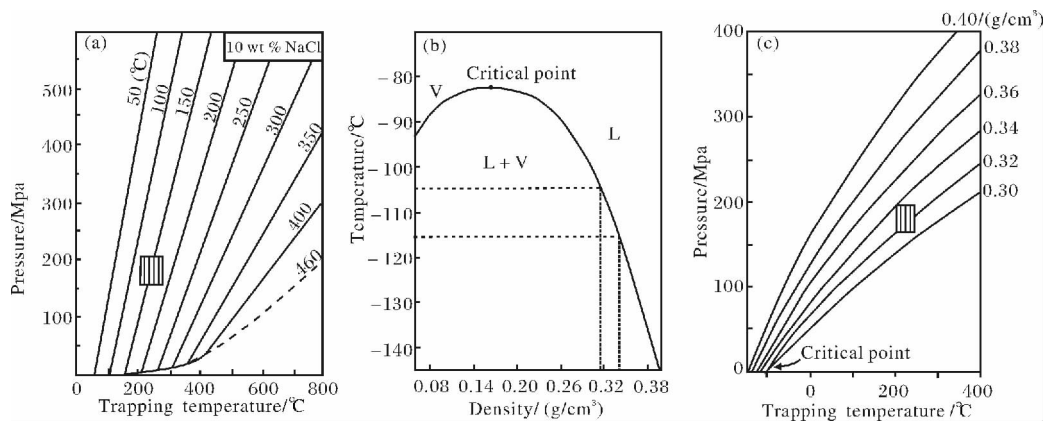


图 5 纤维状方解石脉流体包裹体形成温度、盐度和压力关系相图

Fig. 5 Correlations of formation temperature, salinity and pressure of fibrous calcite

(1) Iso- T_h lines for $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}$ inclusions with salinities of $10 \text{wt}\% \text{NaCl}$ (Bodnar and Vityk, 1994), the outlined area was circled by measured T_h of two-phase aqueous inclusions and trapping temperatures determined by bitumen reflectance (see text); (2) Methane saturation curve (Angus *et al.*, 1976), densities (g/cm^3) of methane rich liquid inclusions determined with correlation to its T_h (see text); (3) Methane densities (g/cm^3) in $P-T$ space (Angus *et al.*, 1976), the outlined area was circled by trapping temperatures of two-phase aqueous inclusions coequal with methane rich liquid inclusions and densities from Fig. 5b (see text).

进行研究^[55],在二叠系—三叠系储层方解石脉和石英脉中发现了形成温度为 170 - 190℃,密度为 0.3455 - 0.3477 g/cm³ 的高温高密度的甲烷包裹体,确定的捕获压力大于 153 - 160 MPa,与本文研究的大巴山前陆构造带现象相似,表明四川盆地东北部与大巴山前陆普遍存在超高压烃类流体排泄现象。

4 含烃包裹体纤维状方解石脉成因分析

碳、氧同位素常被用来反映成岩流体来源与成因特征^[14-6],图6为大巴山前陆构造带含烃包裹体纤维状方解石脉及部分围岩碳、氧同位素分布特征,围岩 $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$ 和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}$ 变化范围分别为 -1.7‰ ~ +3.1‰ 和 -8.7‰ ~ -4.5‰,纤维状方解石脉 $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$ 和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}$ 变化范围分别为 -1.9‰ ~ -4.8‰ 和 -8.4‰ ~ -12.8‰。可以看出纤维状方解石脉碳、氧同位素比围岩均明显变轻。研究认为方解石脉 $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$ 变轻主要与成岩流体中有机质降解或有机碳的加入有关^[152,53]。纤维状方解石脉 $\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}$ 变化范围比围岩大而且 $\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}$ 变轻,也反映了裂隙中成岩流体是不同流体混合的结果^[52,53], $\delta^{13}\text{C} - \delta^{18}\text{O}$ 投影点显示出明显的线性关系(图4),也指示了流体具有二元混合特征,因为大气降水的加入,成岩环境温度的升高以及有机流体的加入等都可以导致成岩流体 $\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}$ 变轻^[53]。包裹体均一温度和含沥青特征都表明本区纤维状方解石脉成岩流体温度较高,综合分析认为,含烃纤维状方解石脉 $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$ 和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}$ 变轻及其二者线性关系,说明含烃纤维状方解石脉是深部有机流体向浅部排泄并与浅部流体混合的地质作用产物。

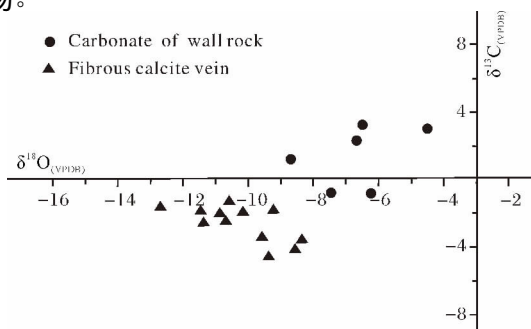


图6 大巴山前陆纤维状方解石脉及其部分围岩碳、氧同位素分布图

Fig.6 Carbon-oxygen isotopic scatter diagram for fibrous calcite veins with their carbonate wall rocks, Dabashan Foreland belt

研究表明,纤维状方解石脉的形成与低渗透性岩石在中浅埋藏阶段压实成岩作用过程中,因剩余压力而产生的超高压成岩流体排泄和运移有关,因此将含烃包裹体纤维状方解石脉作为泥质或者钙质烃源岩在超高压下形成油气并排泄的标志^[13,17]。低渗透性泥岩超高压成岩流体来源主要是蒙脱石向伊利石转化过程中的脱水作用,其证据就是纤维状方解石脉中流体包裹体盐度一般都较低(低于海水盐度,3.5% wt% NaCl)^[11],同时将超高压成岩流体视为油气从烃源岩排出的主要载体,因为纤维状方解石脉中有亮黄色荧光的液态烃包裹体,包裹体均一温度与烃源岩油气形成温度基本一致(大约80℃到120℃)^[13]。

前面包裹体分析结果表明,大巴山前陆构造带纤维状方解石脉中流体包裹体盐度介于 5.26 wt% NaCl 到 13.62 wt% NaCl 之间,平均为 9.7 wt% NaCl,明显高于蒙脱石向伊利石转化过程中形成的脱水盐度,研究认为盐度大于海水盐度的有机流体均来源于盆地深部^[54]。研究区纤维状方解石脉含固体沥青和甲烷等烃类包裹体,而没有发现液态烃包裹体,包裹体均不发荧光,盐水包裹体均一温度主要位于 140℃ 和 196℃ 之间(峰值为 179℃),包裹体中固体沥青最大反射率(R_b) 在 1.75% ~ 2.64% 之间,这些分析数据说明大巴山前陆构造带纤维状方解石脉形成时环境温度明显高于蒙脱石向伊利石转化的温度条件,与之有关的烃类有机质热演化程度达到高过成熟阶段, $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$ 和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}$ 特征显示出纤维状方解石脉具高温有机流体与浅部流体混合特征。以上这些特征一致证明,大巴山前陆构造带含烃包裹体纤维状方解石脉不符合泥岩因压实成岩作用而产生的超高压流体特征,而具有深部相对高温的烃类流体与浅部流体混合流体特征。

5 大巴山超高压流体形成的动力学背景探讨

地质流体排泄和运移动力主要有泥岩压实作用产生的剩余压力(超高异常压力),重力,水动力和构造应力。研究表明,构造应力作用产生的超高压作用是造山带流体大规模排泄和远距离运移的主要动力,因此,将超高压作用视为造山带构造流体演化的主要动力学机制之一^[2,22,23,51]。

对于强烈变形构造环境中超高压地质流体来说,重力和水动力可以忽略不计,因此,泥岩压实作用产生的剩余压力和构造应力是聚合挤压构造环境中超

高压流体排泄和运移的主要动力。前面分析表明,大巴山含烃包裹体纤维状方解石脉不具有泥岩超高压成岩流体的特征,因此,大巴山前陆构造演化过程中的构造应力就是超高压有机流体向浅部排泄的主要动力,也就是含烃包裹体纤维状方解石脉形成的主要动力。

区域地质研究表明,大巴山构造带海相碳酸盐岩沉积从震旦纪一直持续到中三叠世,为油气形成奠定了物质基础,晚三叠世末期印支构造运动结束了海相沉积史而转化为前陆演化阶段^[32, 35]。图 7 为以城口-苗坝地区野外实测地层剖面为代表,恢复并建立的大巴山构造带古生界(下寒武统和下志留统)烃源岩生烃演化历史,由图可以看出,从志留纪早期-中三叠世古生界烃源岩经历正常埋藏生烃热演化,下寒武统烃源岩在早志留世早期埋藏深度达 2 500 m 左右,进入液态烃形成阶段,在二叠纪早期时埋深超过 4 000 m 进入生气阶段。下志留统烃源岩在晚二叠世时开始形成液态烃,与下寒武统烃源岩一起在晚三叠世埋深达最大,二者都处于生气高峰,形成了古天然气藏。晚三叠世末期的印支构造运动使大巴山褶皱隆起,形成一系列自北而南的叠瓦状逆冲推覆构造。晚侏罗世燕山运动使大巴山构造应力场由近南北向挤压转变为近东西向挤压,形成平行于大巴山弧

的褶皱构造带,褶皱轴向自西而东依次由南北向-北西向-东西向转变,印支和燕山构造运动使大巴山古天然气藏伴随构造隆起而遭受改造^[30, 31, 33]。

大巴山纤维状方解石脉及其中沥青、甲烷等烃类包裹体就是在上述构造背景下,天然气在超高压构造动力驱动下排泄和逸散的结果。前面研究表明沥青包裹体为油气运移残余沥青,而非热解青,共生盐水包裹体均一温度峰值为 179℃,在烃源岩生烃历史曲线上对应的时间为构造抬升期(图 7),因此,大巴山前陆构造带形成过程中的构造应力是大巴山天然气排泄的主要驱动力。

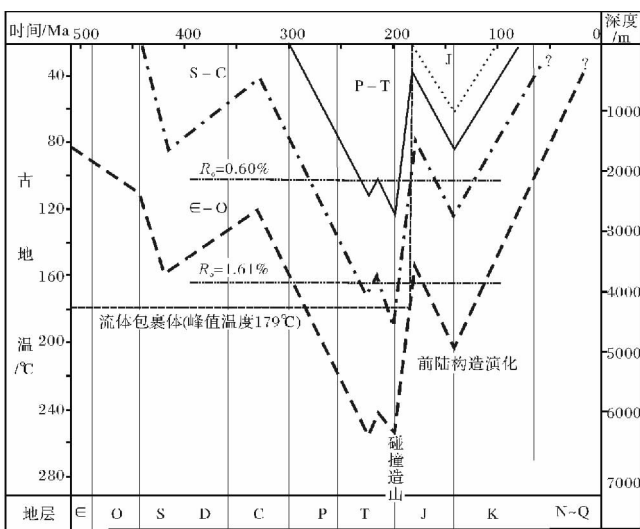
6 结论

大巴山前陆构造带一些断裂和下古生界碳质泥岩和泥灰岩烃源岩微裂隙中充填分布有含烃包裹体纤维状方解石脉,与围岩方解石相比其为低镁方解石,其 $\delta^{13}C_{VPDB}$ 和 $\delta^{18}O_{VPDB}$ 变化范围大而且明显变轻, $\delta^{13}C_{VPDB}$ 和 $\delta^{18}O_{VPDB}$ 具有明显的线性关系,表明纤维状方解石脉为后期成岩流体而非原始沉积流体。纤维状方解石脉含有固体沥青包裹体、甲烷包裹体和气液二相盐水包裹体等多种共生不混溶流体包裹体,其中沥青包裹体为油气运移残余沥青。含烃包裹体纤维状方解石脉形成温度较高,对应的流体有机质达到高过成熟热演化阶段,成岩流体盐度高,不具有泥质烃源岩在中浅埋藏阶段形成超高压油气流体的特征。含烃包裹体纤维状方解石脉代表了一种异常超高压(流体压力为 150~200 MPa)天然气有机流体。结合区域沉积和构造演化特征分析认为,印支碰撞造山运动和燕山前陆构造作用导致大巴山褶皱隆起并伴随天然气藏破坏和改造,挤压环境下的超高压构造应力驱动天然气有机流体排泄和逸散,因此,大巴山前陆构造带含烃包裹体纤维状方解石脉是超高压构造应力驱动天然气排泄和运移的产物。

致谢 一起参加野外工作的还有长安大学赵欣副教授和已经毕业的 2008 级硕士研究生王博和武斌,中国地质科学院胡建民教授和张岳桥教授对本文提出了宝贵意见。本研究工作得到了中国石油化工集团海相事业部经费资助,在此表示感谢。

参考文献(References)

1 Al-Aasm I S, Muir I, Morad S. Diagenetic conditions of fibrous calcite vein formation in black shales: petrographic and chemical evidence [J]. Canadian Journal of Petroleum Geology, 1993, 41: 46-56



注: 占地表温度取值为 25℃; 占地温梯度取值为 3.5℃/100m。
 ∈-寒武系; O-奥陶系; C-石炭系; P-二叠系;
 T-三叠系; J-侏罗系; K-白垩系; N-Q-第三系~第四系
 下寒武统 下志留统 二叠系底 侏罗系底
 烃源岩 烃源岩 底 底

图 7 大巴山前陆构造古生代烃源岩生烃演化历史图
 Fig. 7 Oil/gas generation history of Paleozoic source rocks in Dabashan Foreland

- 2 Badertscher N P , Beaudoin G , Therrien R , *et al.* Glarus overthrust: A major pathway for the escape of fluids out of the Alpine orogen [J]. *Geology* , 2002 , 30: 875-878
- 3 Machel H G. Fibrous gypsum and fibrous anhydrite in veins [J]. *Sedimentology* , 1985 , 32: 443-454
- 4 Marshall J D. Isotopic composition of displacive fibrous calcite veins: reversals in pore-water composition trends during burial diagenesis [J]. *Journal of Sedimentary Petrology* , 1982 , 52: 615-630
- 5 Elburg M A , Bons P D , Foden J , *et al.* The origin of fibrous veins: constrains from geochemistry [J]. *Geological Society , London , Special Publications* , 2002 , 200: 103-118
- 6 Hilgers C , Sindern S. Textural and isotopic evidence on the fluid source and transport mechanism of antitaxial fibrous microstructures from the Alps and the Appalachians [J]. *Geofluids* , 2005 , 5: 239-250
- 7 Hilgers C , Urai J L. On the arrangement of solid inclusions in fibrous veins and the role of the crack-seal mechanism [J]. *Journal of Structural Geology* , 2005 , 27: 481-494
- 8 Means W D , Li T. A laboratory simulation of fibrous veins: some first observations [J]. *Journal of Structural Geology* , 2001 , 23: 857-863
- 9 Monika Kowal-Linka. Origin of cone-in-cone calcite veins during calcitization of dolomites and their subsequent diagenesis: A case study from the Gogolin Formation (Middle Triassic) , SW Poland [J]. *Sedimentary Geology* , 2010 , 224: 54-64
- 10 Sample J C. Stable isotope constraints on vein formation and fluid evolution along a recent thrust fault in the Cascadia accretionary wedge [J]. *Earth and Planetary Science Letters* , 2010 , 293 (3-4) : 300-312
- 11 Uysal I T , Feng Y-X , Zhao J-X , *et al.* Seismic cycles recorded in late Quaternary calcite veins: geochronological , geochemical and microstructural evidence [J]. *Earth and Planetary Science Letters* , 2011 , 303 (1-2) : 84-96
- 12 Kirschner D , Sharp Z , and Teyssier C. Vein growth mechanisms and fluid sources revealed by oxygen isotope laser microprobe [J]. *Geology* , 1995 , 21: 85-88
- 13 Parnell J , Honghan C , Middleton D , *et al.* Significance of fibrous mineral veins in hydrocarbon migration: fluid inclusion studies [J]. *Journal of Geochemical Exploration* , 2000 , 69-70: 623-627
- 14 Jochum J , Friedrich G , Leythaeuser D , *et al.* Hydrocarbon-bearing fluid inclusions in calcite-filled horizontal fractures from mature Posidonia Shale (Hils Syncline , NW German) [J]. *Ore Geological Reviews* , 1995 , 9: 363-370
- 15 Hillier R. D and Cosgrove J W. Core and seismic observations of overpressure-related deformation within Eocene sediments of the Outer Moray Firth , UKCS [J]. *Petroleum Geoscience* , 2002 , 8: 141-149
- 16 Hilgers C , Urai J. Microstructural observations on natural syntectonic fibrous veins: implications for the growth process [J]. *Tectonophysics* , 2002 , 352 (3 4) : 257-274
- 17 Stoneley R. Fibrous calcite veins , overpressures , and primary oil migration [J]. *AAPG Bulletin* , 1983 , 67: 1427-1428
- 18 Conybeare D M and Shaw H F. Fracturing , overpressure release and carbonate cementation in the Everest Complex , North Sea [J]. *Clay Minerals* , 2000 , 35: 135-149
- 19 Shaun L L Barker , Stephen F Cox , Stephen M Egginis , *et al.* Microchemical evidence for episodic growth of antitaxial veins during fracture-controlled fluid flow [J]. *Earth and Planetary Science Letters* , 2006 , 250: 331-344
- 20 Mackenzie W S. Fibrous calcite , a Middle Devonian geological marker , with stratigraphic significance , District of Mackenzie , Northwest Territories , Canada [J]. *Journal of Earth Science* , 1972 , 9: 1431-1440
- 21 Kirschner D L , Masson H , Sharp Z D. Fluid migration through thrust faults in the Helvetic nappes (Western Swiss Alps) [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology* , 1999 , 136: 169-183
- 22 Vrolijk P. Tectonically driven fluid flow in the Kodiak accretionary complex , Alaska [J]. *Geology* , 1987 , 15: 466-469
- 23 Arthur Goldstein , Bruce Selleck and John W. Valley. Pressure , temperature , and composition history of syntectonic fluids in a low-grade metamorphic terrane [J]. *Geology* , 2005 , 33: 421-424
- 24 David V Wiltshcko , George R Lambert , Will Lamb. Conditions during syntectonic vein formation in the footwall of the Absaroka Thrust Fault , Idaho Wyoming Utah fold and thrust belt [J]. *Journal of Structural Geology* , 2009 , 31: 1039-1057
- 25 David V Wiltshcko , Morse J. Crystallization pressure versus crack seal as the mechanism for banded veins [J]. *Geology* , 2001 , 29 (1) : 79-82
- 26 Cobbold P R , Rodriguez N. Seepage forces , important factors in the formation of horizontal hydraulic fractures and bedding-parallel fibrous veins ("beef" and "cone-in-cone") [J]. *Geofluids* , 2007 , 7: 313-322
- 27 Paul D B , Marlina A E , Enrique G. R. A review of the formation of tectonic veins and their microstructures [J]. *Journal of Structural Geology* , 2012 43: 33-62
- 28 Frisia S , Borsato A , Fairchild I J , *et al.* Calcite fabrics , growth mechanisms , and environments of formation in speleothems from the Italian Alps and southwestern Ireland [J]. *Journal of Sedimentary Research* , 2000 , 70: 1183-1196
- 29 Pfiffner O A , and Ramsay J G. Constraints on geological strain rates: Arguments from finite strain states of naturally deformed rocks [J]. *Journal of Geophysical Research* , 1982 , 87: 311-321
- 30 Shi Wei , Zhang Yueqiao , Dong Shuwen , *et al.* Intra-continental Dabashan Orocline , southwestern Qinling , central China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences* , 2012 , 46: 20-38
- 31 董树文 , 胡健民 , 施炜 , 等. 大巴山侏罗纪叠加褶皱与侏罗纪前陆 [J]. *地球学报* , 2006 , 27 (5) : 403-410 [Dong Shuwen , Hu Jianmin , Shi Wei , *et al.* Jurassic superposed folding and Jurassic Foreland in the Daba Mountain , Central China [J]. *Acta Geoscientica Sinica* , 2006 , 27 (5) : 403-410]
- 32 乐光禹. 大巴山造山带及其前陆盆地的构造特征和构造演化 [J]. *矿物岩石* , 1998 , 18 (增刊) : 8-15 [Le Guangyu. Tectonic characteristics and tectonic evolution of Dabashan orogenic belt and its foreland basin [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology* , 1998 , 18 (Supp.) : 8-15]

- 33 施炜,董树文,胡健民,等. 大巴山前陆西段叠加构造变形分析及其应力场特征[J]. 地质学报, 2007, 81(10): 1314-1327 [Shi Wei, Dong Shuwen, Hu Jianmin, *et al.* An analysis of superposed deformation and tectonic stress fields of the western segment of Daba Mountains Foreland[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2007, 81(10): 1314-1327]
- 34 高长林,刘光祥,张玉箴,等. 东秦岭-大巴山逆冲推覆构造与油气远景[J]. 石油实验地质, 2003, 25(增刊): 523-531 [Gao Changlin, Liu Guangxiang, Zhang Yuzhen, *et al.* Thrusting nappe structure and oil-gas potential in eastern Qinling and Daba Mountain. *Petroleum Geology and Experiments*, 2003, 25(Supp.): 523-531]
- 35 汪泽成,邹才能,陶士振. 大巴山前陆盆地形成及演化与油气勘探潜力分析[J]. 石油学报, 2004, 25(6): 23-28 [Wang Zecheng, Zou Caineng, Tao Shizhen. Analysis on tectonic evolution and exploration potential in Dabashan foreland basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2004, 25(6): 23-28]
- 36 王顺玉,戴鸿鸣,王海清,等. 大巴山、米仓山南缘烃源岩特征研究[J]. 天然气地球科学, 2000, 11(4-5): 4-16 [Wang Shunyu, Dai Hongming, Wang Haiqing, *et al.* Characteristic of source rock in south region of Daba and Micang Mountain[J]. *Natural Gas Geosciences*, 2000, 11(4-5): 4-16]
- 37 Coniglio M and Cameron J S. Early diagenesis in a potential oil shale: evidence from calcite concretions in the Upper Devonian Kettle Point Formation, southwestern Ontario[J]. *Bulletin of Canadian Petrology Geology*, 1990, 38: 64-77
- 38 Al-Aasm I S, Veizer J. Diagenetic stabilization of aragonite and low-Mg calcite-2: stable isotopes in rudists[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1986, 56: 763-770
- 39 徐培苍,李如璧,王永强,等. 地学中拉曼光谱[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1996 [Xu Peicang, Li Rubi, Wang Yongqiang, Wang Zhihai, *et al.* Raman Spectroscopy in Geosciences[M]. Shanxi Xi'an: Shanxi Science and Technology Press, 1996]
- 40 Schenk H J, Witte E G. Infrared estimates of aliphatic kerogen carbon in sedimentary rocks[J]. *Organic Geochemistry*, 1986, 10: 1099-1104
- 41 陈安定,黄金明,杨芝文,等. 皖南-浙西下古生界碳沥青成因及南方海相有效烃源岩问题探讨[J]. 海相油气地质, 2004, 9(1-2): 77-83 [Chen Anding, Huang Jinming, Yang Zhiwen, *et al.* Discussions on origin of carbonaceous asphalt in Lower Paleozoic strata in southern Anhui and western Zhejiang and on marine efficiency source rocks in Southern China[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2004, 9(1-2): 77-83]
- 42 Roedder E and Bodnar R J. Geologic pressure determinations from fluid inclusion studies[J]. *Annual Review of Earth Planet Science*, 1980, 8: 263-301
- 43 Bodnar R J and Vityk M O. Interpretation of microthermometric data for H₂O-NaCl fluid inclusions[C]// Vivo De B, Frezzotti M L, eds. *Fluid Inclusions in Minerals, Methods and Applications*. Published by Virginia Tech, Blacksburg, VA, 1994: 117-130
- 44 Jacob H. Disperse solid bitumen as an indicator for migration and maturity in prospecting for oil and gas[J]. *Erdol und Kohle*, 1985, 38: 365
- 45 Barker C E, Pawlewicz M J. The correlation of vitrinite reflectance with maximum temperature in humic organic matter[J]. *Lecture Notes in Earth Science*, 1986, 5: 79-81
- 46 Bodnar R J, Vityk M O. Interpretation of microthermometric data for H₂O-NaCl fluid inclusions[C]// Vivo De B, Frezzotti M L, eds. *Fluid Inclusions in Minerals, Methods and Applications*. Published by Virginia Tech, Blacksburg, VA, 1994: 117-130
- 47 Angus S, Armstrong B, Reuck K M. International thermodynamic tables of the fluid state-5: Methane[M]. New York: Pergamon Press, International Union of Pure and Applied Chemistry, Chemical Data Series, 1976, 16: 247
- 48 Friend D G, Ely J F. Thermophysical properties of methane[J]. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 1989, 18: 583-638
- 49 杨金侠,高胜利,王震亮. 四川盆地中西部上三叠统地层压力特征与油气运聚[J]. 天然气勘探与开发, 2003, 26(2): 6-11 [Yang Jinxia, Gao Shengli, Wang Zhenliang. Triassic formation pressure and hydrocarbon migration in the Midwest area in sichuan basin[J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2003, 26(2): 6-11]
- 50 张金川. 四川盆地页岩气成藏地质条件[J]. 天然气工业, 2008, 28(2): 151-156 [Zhang Jinchuan. Geological conditions of shale gas accumulation in Sichuan basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2008, 28(2): 151-156]
- 51 王震亮,李耀华,张健. 川西地区上三叠统异常流体压力的主要形成机制[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(1): 43-50 [Wang Zhenliang, Li Yaohua, Zhang Jian. Analysis to formation mechanisms of abnormal fluid pressure in the Upper Triassic, west Sichuan area[J]. *Oil/gas Geology*, 2007, 28(1): 43-50]
- 52 Sharp Z, Kirchner D. Quartz-calcite thermometry: A calibration based on natural isotopic variations[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58: 4491-4501
- 53 Wilkinson M, Crowley S F, Marshall J D. Models for the evolution of oxygen isotope ratios in the pore fluids of mudrocks during burial[J]. *Marine Petrology Geology*, 1992, 9: 98-105
- 54 Geoldstein R H. Fluid inclusion in sedimentary and diagenetic systems[J]. *Lithos*, 2001, 55: 159-193
- 55 刘德汉,戴金星,肖贤明,等. 普光气田中高密度甲烷包裹体的发现及形成的温度和压力条件[J]. 科学通报, 2010, 55(4-5): 359-366 [Liu Dehan, Dai Jinxing, Xiao Xianming, *et al.* High density methane inclusions in Puguang gasfield: discovery and a T-P genetic study[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55: 4-5]

Tectonically Driven Organic Fluid Flow in Dabashan Foreland Belt: Recorded by fibrous calcite veins contained hydrocarbon-bearing inclusions

LI Rong-xi¹ DONG Shu-wen² DING Lei³ SHI Wei²

(1. School of Earth science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054;

2. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

3. Research Institute, Shannxi Yanchang Petroleum(Group) Co. Ltd, Xi'an 710075)

Abstract: Fibrous calcite veins with organic inclusions were considered as indication to oil/gas generation and expelling under overpressure. Abundant fibrous calcite veins contained hydrocarbon-bearing inclusions filled in fractures were found in lower Paleozoic hydrocarbon source of black mudstone, clay shale and limestone as well as some faults in Dabashan Foreland Belt. Composition analysis shows that fibrous calcite veins are kind of low magnesium calcite which formed during later diagenesis rather than sedimentary period. $^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$ and $^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}$ of fibrous calcite veins, ranging from -1.9‰ to -4.8‰ and -8.4‰ to -12.8 , respectively, are lighter than that of surrounding carbonate rocks, ranging from -1.7‰ to $+3.1\text{‰}$ and -8.7‰ to -4.5‰ , show obvious linear relationship, which indicates that fibrous calcite veins were mixture fluid from different source fluids. Fibrous calcite veins contain immiscible fluid inclusions such as solid bitumen, methane bearing liquid fluid inclusion and vapor-liquid aqueous inclusions. Bitumen inclusions are residue organic during oil/gas migration. Homogeneous temperatures of vapor-liquid aqueous inclusions are from 140 to 196 °C with peak of 179°C. Salinities of vapor-liquid aqueous inclusions are high with average of 9.7 wt% NaCl. Methods of Iso-P-T phase diagrams of aqueous fluid inclusions and methane inclusions were used to get fluid pressure when fibrous calcite veins formed. The pressure of fibrous calcite vein with hydrocarbon-bearing inclusions in Dabashan Foreland Belt is from 150 to 200 MPa, which indicates of abnormal overpressure fluid. Geology and geochemistry features indicate that fibrous calcite veins contained hydrocarbon-bearing inclusions are not fluid formed by overpressure of mudrocks source rocks at shallow buried phase. However, combined with the regional sedimentary characteristics and tectonic evolution, it indicates that fibrous calcite veins contained hydrocarbon-bearing inclusions were fluid of natural gas drove to expel under overpressure of tectonic stress during Indan-China tectonic movement and Yanshan Foreland tectonics.

Key words: fibrous calcite veins; fluid inclusion; overpressure fluid; fluid flow expelling; Dabashan orogenic belt