

中扬子北缘冲断构造带的古流体记录 及其对页岩气保存意义

——以保地 1 井为例

刘安, 王强, 陈孝红, 李旭兵, 张保民, 李海, 李继涛

中国地质调查局 武汉地质调查中心, 武汉 430205

摘要:为研究中扬子北缘大洪山冲断带古流体特征及其对页岩气保存的指示意义,以该区保地 1 井为例,系统采集志留系裂缝脉体样品并开展流体地球化学与包裹体分析。测试结果显示,方解石脉 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化范围为 -8.19‰ ~ 0.16‰ ,碳同位素最小值远小于志留系灰岩夹层,也小于海相碳酸盐岩,结合脉体包裹体群脱硫系数高达 23.53~87.90 且自下而上具有降低的趋势,表明古流体中有下伏寒武系膏岩层卤水混入,导致古流体 SO_4^{2-} 增高,以及寒武系 TSR 产生的 H_2S 、 CO_2 沿着裂缝系统进入志留系,致使方解石脉 $\delta^{13}\text{C}$ 负偏和钻遇地层气中发现 H_2S 。志留系龙马溪组底部包裹体类型以纯水溶液包裹体为主,最大均一温度峰值值为 $110\sim 120\text{ }^\circ\text{C}$,最小均一温度峰值为 $60\sim 80\text{ }^\circ\text{C}$;结合区域构造演化,大洪山冲断带较川东地区志留系页岩抬升剥蚀时间早,古流体形成阶段埋深浅、温度低、含气饱和度低。滑脱带附近包裹体均一温度变化范围大,最低均一温度发育于该段,表明滑脱带构造活动期次更多、持续时间更长,特别是晚期构造活动更强,成为页岩气逸散的长期通道。综合分析表明,大洪山冲断带发育多个滑脱层的冲断、变形,对多层系页岩气藏和常规气藏破坏较大。

关键词:古流体;页岩气;保存条件;包裹体;地球化学;大洪山冲断带;中扬子北缘

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Geochemical characteristics of paleo-fluids in thrust belt in the northern Middle Yangtze and its significance for shale gas preservation: a case study of well Baodi 1

LIU An, WANG Qiang, CHEN Xiaohong, LI Xubing, Zhang Baomin, LI Hai, Li Jitao

Wuhan Center of Geological Survey, China Geological Survey, Wuhan, Hubei 430205, China

Abstract: To study the geochemical characteristics of paleo-fluids in the Dahongshan thrust belt of Middle Yangtze and its significance for shale gas preservation, in this study, Silurian vein samples were collected from well Baodi 1 and fluid geochemistry and inclusions were systematically analyzed. Results show that the variation range of $\delta^{13}\text{C}$ of calcite veins is -8.19‰ to 0.16‰ , with the minimum value much lower than that of Silurian limestone interlayer and marine carbonate. The desulfurization coefficient of vein inclusion group is 23.53 to 87.90, with downward trend from bottom to top. It is indicated that the SO_4^{2-} in paleo-fluid of Silurian increases because of the mixing of underlying Cambrian gypsum brine, as well as CO_2 and H_2S entering into Silurian along fracture system from Cambrian TSR productions, resulting in negative $\delta^{13}\text{C}$ of calcite veins and H_2S show in drilled formations. The inclusions at the bottom of Silurian Longmaxi Formation are mainly pure aqueous solution inclusions. The maximum homogenization temperature peak is about 110 to $120\text{ }^\circ\text{C}$, and the minimum homogenization temperature distribute from 60 to $80\text{ }^\circ\text{C}$. Compared with those in the eastern Sichuan Basin, the shale in Dahongshan thrust belt entered uplifting and denudation stage earlier, and the paleo-fluid formation stage had shallower burial depth, low temperature and low gas saturation. The range of homogenization temperature of inclusions near the detachment zone is wider, and the lowest homogenization temperature is developed in this section, indicating the detachment zone has more periods of tectonic activity and longer duration time, especially in the later stage,

收稿日期: 2021-05-10; 修订日期: 2022-05-25。

作者简介: 刘安(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事古流体与页岩气成藏、保存研究。E-mail: globstar@163.com。

通信作者: 李旭兵(1974—), 男, 教授级高级工程师, 从事油气地质综合研究。E-mail: yclxubing!@163.com。

基金项目: 国家科技重大专项(2016ZX05034001-002)和中国地质调查局项目(DD20190558, DD20221659)联合资助。

which has become a long-term channel for shale gas escape. Comprehensive analysis shows that there are many detachment layers in the Dahongshan thrust belt, and the thrust and deformation destroyed multi-layer shale gas reservoirs and conventional gas reservoirs.

Key words: paleo-fluids; shale gas; preservation condition; inclusions; geochemistry; Dahongshan thrust belt; northern Middle Yangtze

冲断构造在造山带及其前缘普遍发育,世界许多盆地的大油田赋存于该构造部位^[1]。巴洪冲断带横贯中上扬子北缘地区,大巴山冲断带属于巴洪冲断带的西段,因位于四川盆地北缘,在地质结构、流体运移、油气成藏等方面研究程度非常高^[2-5]。位于中扬子北缘的大洪山冲断带属于巴洪冲断带的东段,其油气地质研究程度明显低于西段。近年来页岩气调查表明,保存条件是复杂构造区页岩气富集的关键因素之一,因此,有必要进一步明确中扬子北缘冲断构造带的保存条件。古流体成分、形成的温度、压力条件以及氧化还原条件等地质信息,对研究页岩气保存条件具有重要的指示作用^[6-9],在页岩气单井保存条件评价以及有利区优选方面获得了发展^[10-11]。本文主要以保地1井为研究对

象,通过系统研究该井的古流体特征,明确构造活动对中扬子北缘冲断构造带页岩气保存的影响。

1 地质背景

中扬子北缘冲断带北以襄广断裂为界,南到京山—乌龙泉断裂,普遍缺失中三叠统一侏罗系,仅见志留系区域性盖层断续分布(图1a-b)。震旦纪—中三叠世,研究区以海相沉积为主,发育寒武系牛蹄塘组、志留系龙马溪组等多套富含有机质页岩,特别是在神农架背斜、黄陵背斜、当阳复向斜以北的巴洪冲断带页岩非常发育。中晚三叠世开始,扬子板块随着勉略洋的闭合,向北与秦岭—大别微板块发生俯冲碰撞作用^[12],在扬子板块与秦岭—大别微板块之间形成襄樊—广济边界断裂^[13],

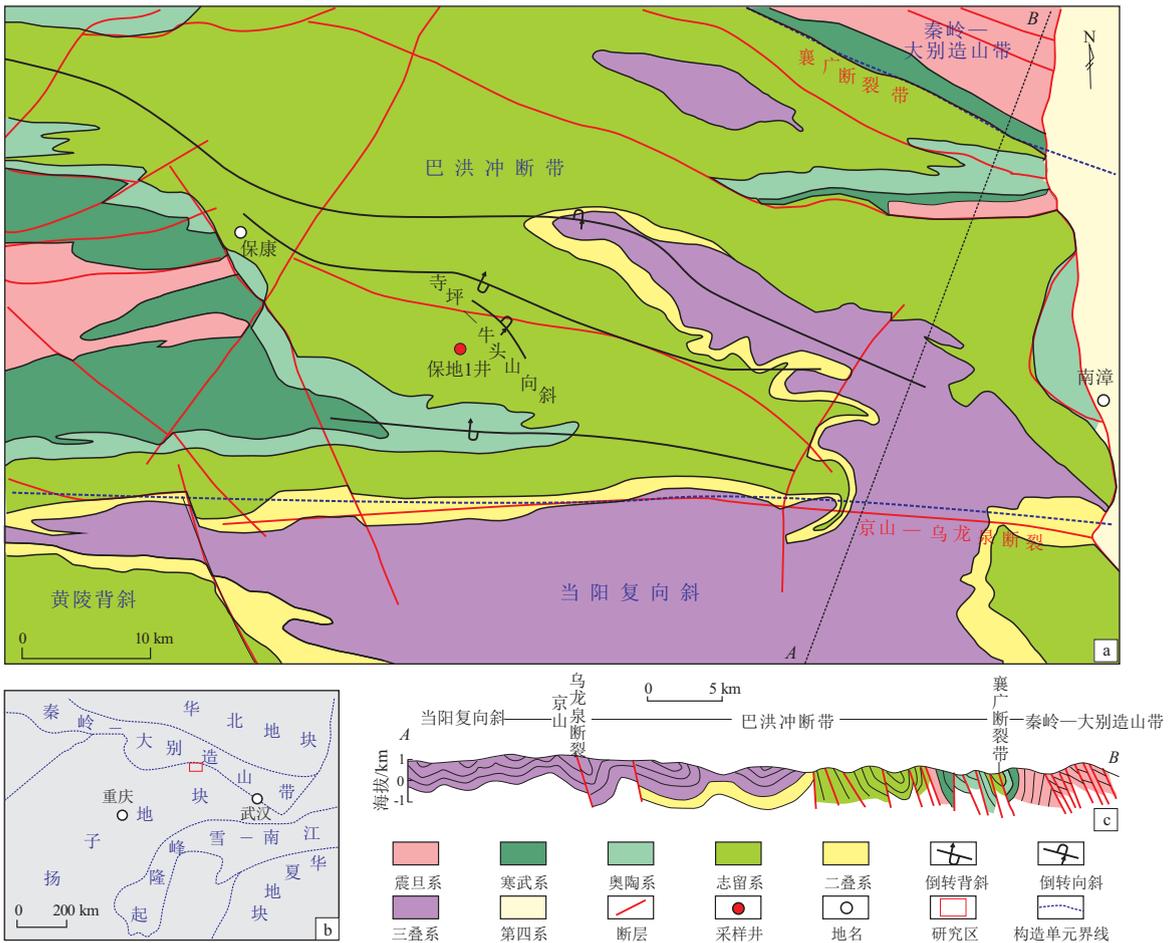


图1 中扬子北缘冲断构造带构造特征及采样位置

Fig.1 Regional structural geology features and sampling points of northern Middle Yangtze

并形成扬子板块北缘前陆盆地系统,中侏罗世后研究区全面转变为陆内构造变形,晚侏罗世至早白垩世期间,秦岭南缘大巴山、大别山等分别大规模向南的逆冲推覆作用对早期扬子板块北缘前陆盆地系统进行了强烈改造^[14-16]。在推覆作用下形成一系列北倾倒转复背斜和倒转复向斜以及 NNE 和 NNW 向断层(图 1a,c)。

保地 1 井位于襄阳市保康县黄堡镇水库村,构造上位于寺坪—牛头山倒转复式向斜内部的次级褶皱尖山倒转向斜西翼。保地 1 井开孔层位为志留系纱帽组,完井层位为志留系龙马溪组。自上而下钻遇地层为纱帽组(井深 0~361 m),岩性为黄

灰色泥岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩与粉砂岩互层;罗惹坪组(井深 361~832 m),岩性为黄绿色薄层状泥岩、粉砂质泥岩、生屑灰岩、泥灰岩;马溪组(井深 832~1 445 m),岩性为浅灰色泥岩、粉砂质泥岩、灰黑色薄层状碳质泥岩。井深 1 445 m 以下出现断层重复,为龙马溪组(井深 1 445.00~1 604.75 m),岩性为泥岩、钙质泥岩,内部见多个滑脱面(图 2);两段龙马溪组均未见底,TOC 含量普遍小于 1%。保地 1 井主要见两段气显,其中井深 426~460 m 钻遇志留系罗惹坪组,岩性为泥岩、粉砂质泥岩夹生屑灰岩,录井全烃异常最大 28%,长时间静置保持在 13%~25%之间;井深 1 280~1 305 m 钻遇龙马溪

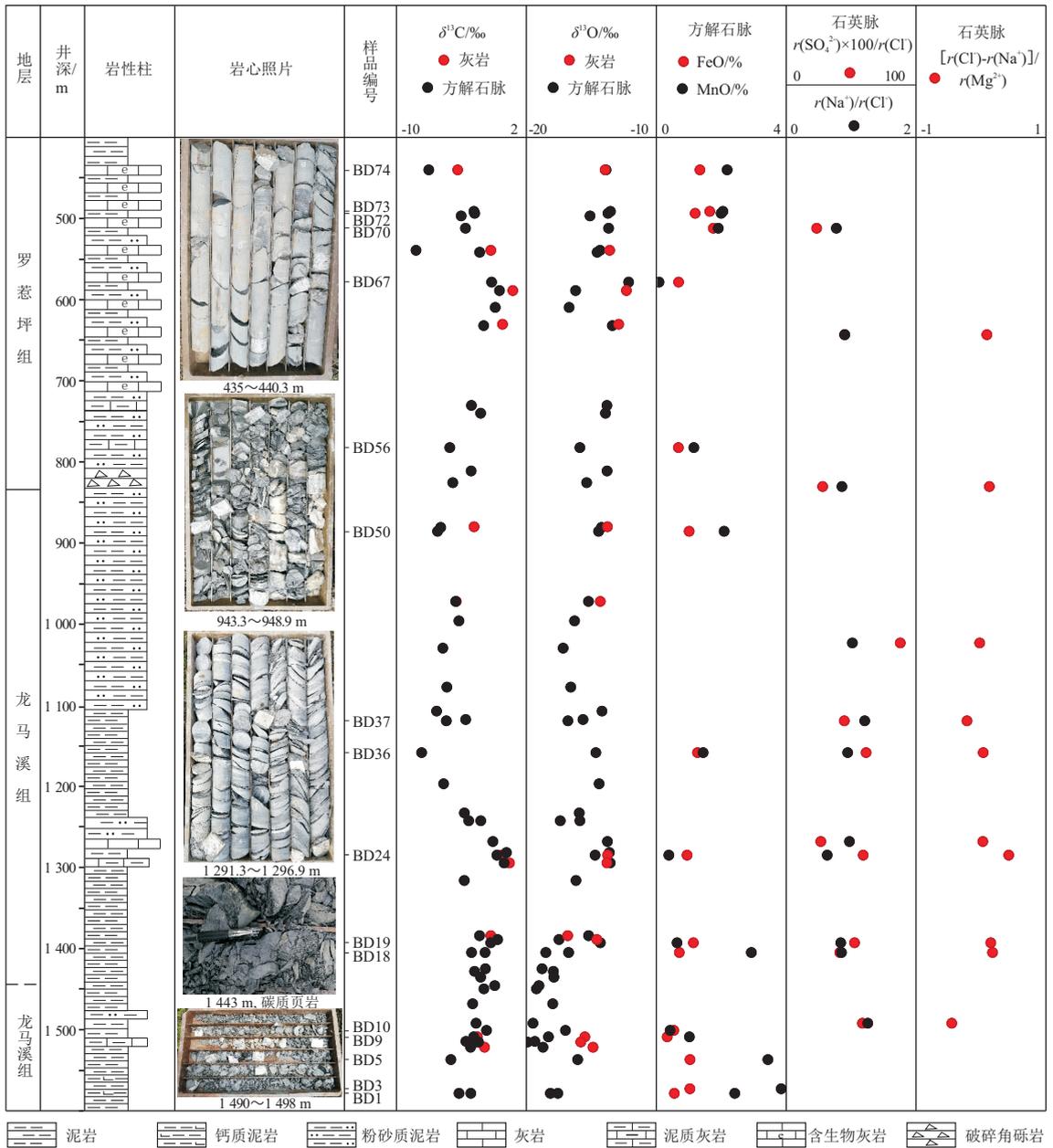


图 2 中扬子北缘保地 1 井方解石脉地化组分及流体包裹体组分综合柱状图

Fig.2 Composition of calcite veins and fluid inclusions in well Baodi 1, northern Middle Yangtze

组泥岩、泥灰岩夹灰岩,石英脉发育,录井全烃异常值最大为7.9%,甲烷含量最高为5.2%。保地1井气显含有硫化氢,录井设备报警。

2 样品采集与测试

保地1井岩心裂缝极为发育,本次研究对保地1井做了较为系统的采样。选取宽度大于1 cm的脉体,选取5~10 g单矿物进行包裹体群组分析;牙钻钻取方解石脉粉末进行碳氧同位素测试;脉体磨制薄片后进行电子探针分析以及包裹体测温。其中流体包裹体群组分析测试、包裹体测温在核工业北京地质研究院完成,电子探针、碳氧同位素测试在自然资源部中南测试中心完成。电子探针仪器型号为EPMA1600,测试精度大于 10×10^{-6} ,薄片先镀膜制片,再在显微镜下选择合适的测点完成测试。碳氧同位素测试在MAT253上完成,先将样品研磨至200目加热去除吸附水后,置于真空反应器中与磷酸25℃恒温反应24 h,纯化、收集生成的CO₂气体再测定碳氧同位素组成,结果以相对碳稳定同位素标准物质(V-PDB)的值给出,分析误差 $\pm 0.2\%$ 。包裹体均一温度和盐度测试采用LINKAM THMS600型冷热台,依据《矿物流体包裹体温度的测定:EJ/T 1105—1999》方法测试。包裹体群离子组分分析设置550℃爆裂温度在真空条件下将石英矿物包裹体打开,加入蒸馏水提取清液,在DIONEX-500离子色谱仪测试阴阳离子组分。

3 测试结果

3.1 电子探针

电子探针分析保地1井方解石脉,主要检测出Na₂O、K₂O、CaO、TiO₂、Al₂O₃、FeO、SiO₂、CaO、MnO组分,主要组分CaO含量为52%~61.7%,MgO含量为0.047%~0.563%,FeO含量为0.337%~1.757%,MnO含量为0.083%~3.846%,其中FeO、

MnO组分的含量纵向变化较大(图2)。

3.2 碳氧同位素

保地1井方解石脉 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化范围为 -8.19% ~ 0.16% , $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围为 -19.91% ~ -12.13% ;志留系灰岩夹层的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化范围为 -4.47% ~ 0.75% , $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围为 -16.82% ~ -12.30% (图2)。

3.3 包裹体岩相

保地1井裂缝脉体矿物有石英和方解石,包裹体以纯水溶液包裹体为主,另见少量的气相包裹体、气液两相包裹体,其中纯水溶液包裹体普遍占比高于90%。

(1)气相包裹体:石英和方解石中均发现该类包裹体,定向、自由分布,大小3~20 μm ,见椭圆形、菱形,石英矿物中部分见负晶形,包裹体呈灰黑色(图3a),与气液两相包裹体共生(图3b)。

(2)气液两相包裹体:室温下呈气液两相,定向分布或小群分布,包裹体大小为3~20 μm ,多数小于10 μm ,方解石中以较规则的长条状、长方形为主(图3c),石英中以米粒状为主,部分形状不规则,气液比普遍小于5%,沿显微裂缝尤为发育。

(3)纯水溶液包裹体:室温下为液相,在方解石和石英矿物中自由分布或定向分布,包裹体大小介于2~30 μm ,一般为无色,长条状或米粒状(图3d),沿裂缝定向分布的包裹体一般形状不规则。

3.4 包裹体均一温度、盐度

流体包裹体均一温度分布的范围相对较广,为59~121℃,自上而下均一温度具有一定的变化规律(图4)。上部BD50、BD72、BD74样品的均一温度峰值较为一致。方解石脉均一温度峰值为80~110℃。中部BD37样品方解石包裹体均一温度峰值为110~120℃,石英包裹体均一温度峰值为100~120℃。BD36样品方解石脉原生包裹体均一温度峰值为90~110℃。BD19样品方解石和石英包裹体均一温度峰值分别为90~110℃和110~130℃。

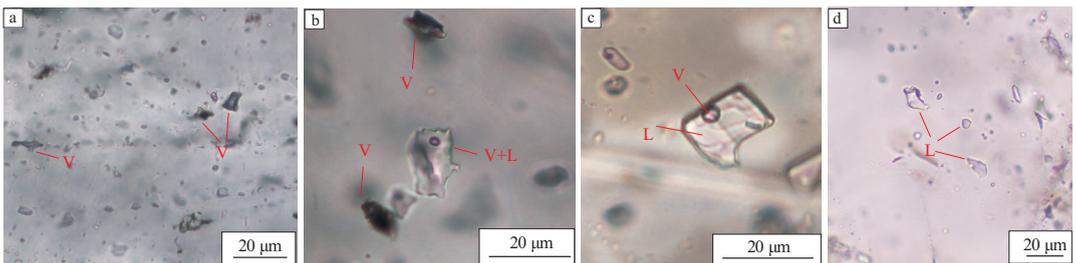


图3 中扬子北缘保地1井脉体包裹体特征

a.带状分布气相包裹体,样品号BD37,井深1119.3 m;b.气相包裹体与气液两相包裹体共生,样品号BD3,井深1572.5 m;c.气液两相包裹体,样品号BD72,井深493.8 m;d.自由分布的纯水溶液包裹体,样品号BD37,井深1119.3 m;V为气相,L为液相

Fig.3 Characteristics of fluid inclusions in fracture veins, well Baodi 1, northern Middle Yangtze

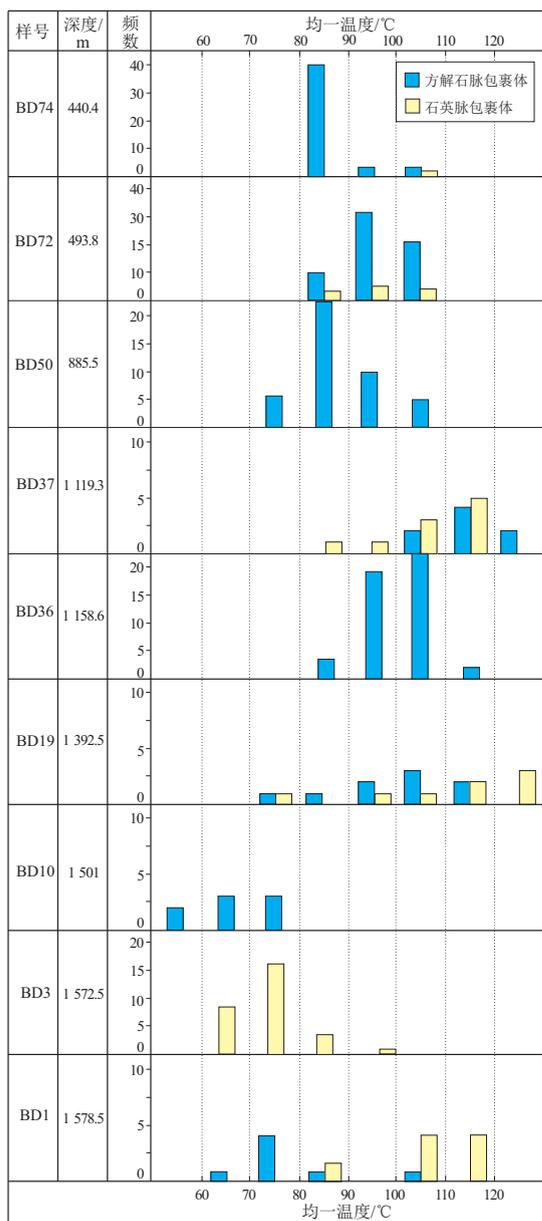


图 4 中扬子北缘保地 1 井包裹体均一温度直方图
Fig.4 Homogeneous temperatures of fluid inclusions in well Baodi 1, northern Middle Yangtze

下部 BD10 样品方解石包裹体均一温度峰值为 60~80 °C, 样品 BD3 石英包裹体均一温度峰值与之相似。底部 BD1 样品方解石与石英包裹体温度差别较大, 均一温度峰值分别为 60~70 °C 和 100~120 °C。流体包裹体盐度值主要分布于 2%~10%, 变化较大。

3.5 包裹体群组分析

石英脉样品通过爆裂法获得了单矿物中的阴阳离子含量, 阴阳离子含量通过转换为毫克当量计算钠氯系数(r_{Na^+}/r_{Cl^-})、变质系数 $[r(Cl^-)-r(Na^+)]/r(Mg^{2+})$ 、脱硫系数 $[r(SO_4^{2-}) \times 100/r(Cl^-)]$ (表 1); 样品钠氯系数为 0.63~1.26, 变质系数为 -0.45~0.79, 脱硫系数为 23.53~87.90。

4 讨论

4.1 古流体性质及来源

4.1.1 电子探针

电子探针获得了方解石脉的元素地球化学组分, 可以指示其形成环境。一般而言, 在氧化的成岩环境下, Mn^{2+} 趋向于被氧化为高价态不易置换的 Ca^{2+} 进入方解石晶格; 在还原环境中, Mn^{2+} 、 Fe^{2+} 溶解度比较大, 埋藏过程中形成的碳酸盐矿物的 Mn^{2+} 、 Fe^{2+} 含量也较高^[8,17], 因此脉体 Mn^{2+} 、 Fe^{2+} 的含量可以指示方解石脉体生成时所处的地层水环境和流体来源。保地 1 井上部样品 BD72、BD74 等 Mn^{2+} 、 Fe^{2+} 值都较高; 而样品 BD10 的 Mn^{2+} 、 Fe^{2+} 值在该层段样品中最低, 同时该样品包裹体均一温度也是该井最低的, 因此, 样品 BD10 代表了在浅埋藏阶段相对氧化的形成环境。原生包裹体均一温度可能代表了方解石形成的温度, 后期挤压隆升剥蚀温度降低, 方解石次生包裹体代表了晚期流体活动。样品 BD1 包裹体均一温度峰值较低, 但是代

表 1 中扬子北缘保地 1 井石英脉包裹体群离子组分统计

Table 1 Statistics of ion composition of quartz vein inclusions in well Baodi 1, northern Middle Yangtze

样号	井深/m	离子含量/($\mu g \cdot g^{-1}$)								$r(Na^+)/r(Cl^-)$	$[r(Cl^-)-r(Na^+)]/r(Mg^{2+})$	$r(SO_4^{2-}) \times 100/r(Cl^-)$
		F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺			
BD11	1 492.3	0.420	2.06	1.50	1.64	1.68	0.632	0.405	1.66	1.26	-0.45	58.72
BD18	1 404.8	0.499	2.66	1.68	1.49	1.47	0.593	0.755	4.19	0.85	0.18	41.32
BD19	1 392.5	0.283	1.61	1.79	1.15	0.88	0.393	0.582	5.61	0.84	0.15	52.68
BD24	1 284.6	0.593	3.63	1.43	2.92	1.49	0.709	1.070	15.90	0.63	0.43	59.33
BD26	1 267.9	0.577	3.51	1.86	1.27	2.22	0.551	1.040	6.08	0.98	0.03	26.69
BD36	1 158.6	0.369	2.18	1.44	1.82	1.34	0.752	1.120	6.74	0.95	0.03	61.58
BD37	1 119.3	0.375	2.42	1.28	1.47	1.90	0.540	0.810	3.22	1.21	-0.22	44.80
BD43	1 023.5	0.280	2.66	1.17	3.17	1.76	0.533	0.946	2.61	1.02	-0.02	87.90
BD53	830.0	0.297	3.75	1.17	1.43	2.09	0.587	1.400	4.71	0.86	0.13	28.13
BD62	643.5	0.289	2.24	1.09	1.37	1.31	0.626	0.827	4.38	0.90	0.09	45.11
BD70	512.3	0.269	5.80	1.17	1.85	2.91	0.798	0.616	3.23	0.77	0.73	23.53

表方解石形成阶段的最大均一温度(近 110 °C),因此 Mn^{2+} 、 Fe^{2+} 值较高代表了解方石形成处于埋藏较深、相对还原的环境。

4.1.2 碳氧同位素

一般条件下碳酸盐岩的碳同位素非常稳定,对温度不敏感,只有各种有机来源的 CO_2 混入才会导致碳同位素有较大的变化,断裂带甲烷氧化形成的 CO_2 混入流体,形成的方解石脉的 $\delta^{13}C$ 可低至 $-35‰ \sim -41‰$,混入甲烷成因的碳越多则数值越低^[9,18]。保地1井方解石脉 $\delta^{13}C$ 值与围岩相比较,差值变化范围自下而上有增加的趋势;特别是部分的 $\delta^{13}C$ 值明显低于灰岩,表明其来源与有机质氧化成因的碳更为密切。方解石脉及围岩 $\delta^{13}C$ — $\delta^{18}O$ 协变图(图5)也表明,部分方解石样品的 $\delta^{13}C$ 值超出了海相碳酸盐岩的范围,在调查区裂缝活动阶段没有岩浆活动介入的情况下,有机质的氧化是造成方解石碳同位素偏负的主要原因。灰岩 $\delta^{13}C$ 值属于海相碳酸盐岩的范围, $\delta^{18}O$ 值超出海相变化的范围表明其成岩过程中受到一定程度的蚀变。

方解石的氧同位素除了受到来源物质初始同位素值影响,还受到水/岩比例、形成温度的影响。温度越高分馏程度越高,在相同水岩比例条件下,封闭体系比开放体系中岩石的氧同位素降低幅度要低^[19],因此,氧同位素可以作为流体环境封闭性判别指标^[9]。保地1井方解石脉 $\delta^{18}O$ 值与围岩相比较,差值变化范围自下而上有降低的趋势,二者在下部的差值明显较大,特别是在 1 400 m 以深层段;流体包裹体指示方解石形成阶段温度并没有高于上部岩层,因此温度不是引起方解石脉 $\delta^{18}O$ 值远低于围岩的主要原因,该阶段水岩比例较高的相对开放环境可能是造成氧同位素

分馏的主要原因。

4.1.3 包裹体离子组分

钠氯系数、变质系数、脱硫系数属于油田水化学分析的常用特征参数^[20],也可用于古流体来源分析^[7]。

受大气水淋滤影响的地下水钠氯系数一般大于 1,变质系数反映地层水的浓缩变质程度,如果数值小于 0,反映地层水封闭性破坏^[20]。保地1井少部分样品钠氯系数大于 1,同时变质系数小于 0,表明部分古流体中有大气水的混入。

地层水的脱硫系数越小,地层的封闭性越好,通常把脱硫系数 1 作为脱硫作用是否彻底的界限值^[10,20]。本次研究的样品脱硫系数均大于 1,远超正常的沉积成岩环境的流体,一般在富含硫酸盐的环境下会出现这类情况,例如膏盐^[21]。在四川盆地嘉陵江组地层水脱硫系数大于 1 具有普遍性,由于储层发育了大量的膏盐,不断被地层水溶滤,导致地层水中 SO_4^{2-} 含量增高,虽然一部分经过脱硫酸作用转化为 H_2S ,仍然会残留大量的 SO_4^{2-} 导致地层水脱硫系数大于 1,同时可能会导致钠氯系数、变质系数的失真^[22]。保地1井志留系气显中含硫化氢,且包裹体离子组分指示其形成阶段富含 SO_4^{2-} ,硫的来源可能是下伏地层。

保地1井流体包裹体样品揭示了多数裂缝形成的最大古地温一般低于 120 °C,温度是 TSR 反应的驱动力,也是控制 TSR 进行与硫化氢生成的关键因素之一,而 TSR 反应的温度下限是 120 °C,且温度越高,越有利于 TSR 快速进行^[23]。另外志留系本身缺乏 TSR 反应所需的硫酸盐夹层,所以保地1井裂缝气中 H_2S 可能不是在志留系中形成。包裹体离子组分较高的脱硫系数表明裂缝形成阶段有富硫酸根离子流体混入,且古流体脱硫系数总体上自上而下具有增高的趋势,揭示了硫酸根可能是古流体沿裂缝向上运移所致。鄂西地区寒武系覃家庙组膏盐广泛分布,在宜昌多口井均钻获膏盐层,是海相地层中主要的膏盐来源。因此保地1井硫酸根的来源可能主要为下伏寒武系,推覆构造形成的裂缝系统将深部的富硫酸根流体带到了志留系,同时也将 TSR 反应生成的 H_2S 、 $\delta^{13}C$ 值极低的 CO_2 带入志留系,导致志留系部分方解石脉 $\delta^{13}C$ 值负偏程度高以及天然气中发现 H_2S 。

4.2 冲断构造带古流体演化及页岩气的保存

4.2.1 古流体对页岩气保存条件的指示

冲断带古流体地化特征揭示了其性质及来源,保地1井志留系古流体受到了下伏地层流体以及

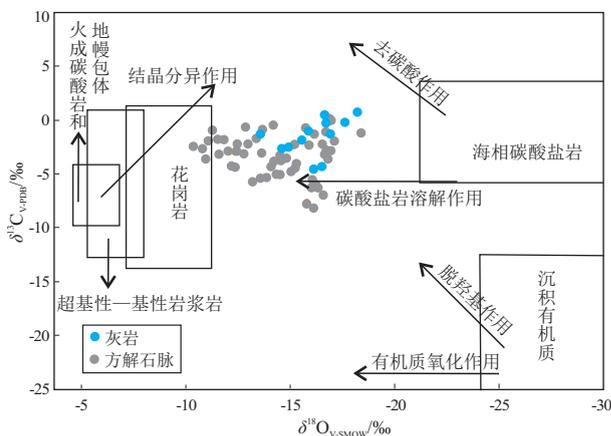


图5 中扬子北缘保地1井方解石脉及围岩 $\delta^{13}C$ — $\delta^{18}O$ 协变图

Fig.5 $\delta^{13}C$ vs. $\delta^{18}O$ of calcite veins and wall rocks in well Baodi 1, northern Middle Yangtze

表 2 中扬子北缘保地 1 井与其他地区志留系包裹体类型及均一温度对比

Table 2 Comparison of types and homogeneous temperature of Silurian inclusions in well Baodi 1, northern Middle Yangtze and other areas

项目	保地 1 井	鄂西地区	焦石坝	南川	丁山
包裹体类型	纯水包裹体为主	液相和气液两相包裹体	纯甲烷和气液两相包裹体	纯甲烷和气液两相包裹体	纯甲烷和气液两相包裹体
均一温度最低值/℃	59	90	141.2	118.5	85.7
均一温度最高值/℃	121	271	201.1	240.8	229.6
均一温度峰值/℃	60~80, 110~130 等	小于 130 为主	150, 190~210	160~190, 230~240	100~120, 170~210
抬升开始时间	侏罗纪	侏罗—白垩纪	85 Ma	70 Ma	60 Ma

注:鄂西地区数据据 LIU 等^[7];焦石坝、南川、丁山数据据 NIE 等^[25]。

大气降水的影响。流体包裹体均一温度揭示了裂缝活动的深度、持续的时间、期次等信息。通过与焦石坝、南川、丁山以及鄂西地区志留系包裹体对比分析发现,保地 1 井包裹体的最大均一温度、均一温度的峰值往往低于上述地区,包裹体类型也有明显的区别(表 2)。

焦石坝、南川、丁山地区志留系页岩保存条件优越,地层以超压为主^[6,24],且包裹体类型以纯甲烷包裹体和气液两相包裹体为主;鄂西地区以气液两相包裹体和水溶液包裹体为主;而保地 1 井则以纯水溶液包裹体为主。焦石坝、南川、丁山地区包裹体的最大均一温度普遍超过 200℃,埋藏深度普遍超过 6 000 m,晚期构造裂缝形成的流体包裹体均一温度峰值也高于 100℃,埋藏深度大于 5 000 m,并且裂缝的形成时间是在晚白垩世以来的抬升剥蚀阶段,裂缝以封闭体系中形成的为主,部分井形成的裂缝时间晚、埋藏浅,对保存条件有负面影响^[6,25]。鄂西地区滑脱带流体包裹体特征较为复杂,包裹体均一温度变化区间较大,以小于 130℃为主,最高可达 200~210℃;志留系底部滑脱带形成了横向渗透层,造成页岩气发生横向运移^[7]。

保地 1 井裂缝脉体包裹体的均一温度普遍非常低,表明裂缝形成的埋深相对要浅。以保地 1 井龙马溪组底部包裹体为例,最大均一温度峰值约 110~120℃,最小均一温度峰值为 60~80℃,将地表温度设置为 20℃,印支期—燕山期地温梯度大约为 2.5℃/hm^[26],推测古流体形成的埋深分别为 3 600~4 000 m 和 1 600~2 400 m。中扬子地区大规模抬升剥蚀主要与印支期以来扬子板块和华北板块、华夏板块对冲挤压有关,由造山带向陆内构造挤压逐渐减弱,构造活动的时间逐渐变晚^[27]。因此,构造活动的强度由保地 1 井—鄂西地区—川东地区降低,抬升剥蚀的时间变晚。页岩的抬升时间越早,生烃停止时间越早,页岩气处于持续的散失时间就越长,由造山带向陆内页岩的保存条件整

体具有变好的趋势。保地 1 井均一温度小于 100℃的流体包裹体比例非常高,表明在晚期浅埋藏阶段构造活动强烈,在上覆盖层剥蚀程度较高的条件下,会明显加剧页岩气的逸散。

保地 1 井 1 500~1 600 m 层段流体包裹体均一温度是该井流体包裹体均一温度最低的层段,均一温度低于 80℃,表明了滑脱构造带与一般性构造裂缝流体活动的差异性,滑脱带构造活动期次更多、持续时间更长,特别是晚期构造活动更强,成为页岩气逸散的长期通道,导致志留系滑脱带上部和下部富有机质页岩含气性低。保地 1 井气显活跃层段分布在 426~460 m 和 1 280~1 305 m 井段,流体包裹体测试结果整体温度较高,表明裂缝形成之后,晚期的构造破坏较弱,流体活动不强烈,是裂缝中天然气得以保存的主要原因。

大洪山冲断构造带构造变形强烈,逆冲推覆构造受到软弱层的制约,研究区发育了震旦系陡山沱组、寒武系牛蹄塘组、志留系、三叠系、侏罗系多个以泥岩为主要岩系的滑脱层。保地 1 井揭示了滑脱构造导致志留系的缺失和重复;多个断坪断坡构造和强烈挤压褶皱导致了裂缝非常发育,将多个层系沟通,加剧了页岩气的逸散。

4.2.2 古流体活动与页岩气逸散模式

大洪山冲断带位于秦岭—大别造山带的南侧,印支期以来的逆冲推覆构造形成的断坡或相关断裂及裂缝系统促使了龙马溪组页岩气逸散,同时将志留系与下伏寒武系气藏沟通(图 6)。寒武系覃家庙组富含膏盐,与寒武系牛蹄塘组生成的油气发生了 TSR 反应,断裂将寒武系古流体带到上覆志留系,寒武系古流体属于富含 H₂S 的天然气以及富含 SO₄²⁻的溶液。保地 1 井气显最强层段主要位于罗惹坪组灰岩段,而下部龙马溪组页岩段反而气显不强烈,这主要与不同层段裂缝类型不同有关。罗惹坪组裂缝在下部龙马溪组页岩气充注后构造活动相对较弱,部分裂缝被方解石脉、石英脉充填,

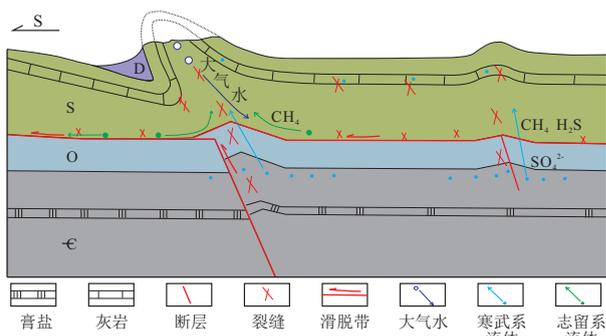


图6 中扬子北缘冲断带页岩气散失模式

Fig.6 Shale gas dispersion mode in thrust belt, northern Middle Yangtze

抑制了气体的逸散,气体组分含有 H_2S 表明寒武系流体混入其中。

龙马溪组以泥页岩为主,成为志留系滑脱构造面,多期次挤压推覆使得上覆盖层剥蚀减薄,滑脱带经历了长时间的构造活动,发育多期次裂缝,成为页岩气长期向上逸散的通道,同时也成为大气水向下渗入的通道,导致龙马溪组页岩段含气性差。该阶段滑脱带裂缝充填的方解石、石英脉捕获了大量的晚期低温流体包裹体,且包裹体以水溶液为主,与封闭性好的页岩段以高密度甲烷包裹体为主^[25]具有明显的区别。龙马溪组缺乏深埋阶段形成的富甲烷包裹体也与滑脱带构造活动强烈相关。前人统计分析表明四川盆地沉积成岩裂缝比例高,而四川盆地之外构造复杂区则主要发育构造裂缝^[28],盆外成岩阶段裂缝充填矿物在强烈的后期构造活动中受挤压破碎,流体包裹体大量消失或者改造^[7]。

保地1井揭示了在大洪山冲断构造带冲断构造将深部寒武系流体带入志留系,以及志留系页岩段因滑脱构造活动持续,导致志留系页岩段缺失和重复,以及页岩段页岩气藏被破坏。大洪山冲断带发育多个滑脱层的冲断、变形,多层系页岩气藏和常规气藏被破坏。同时,表明中扬子大洪山冲断带以南的黄陵背斜、当阳复向斜等区域属于巴东—大冶对冲干涉带,构造变形减弱,构造保存条件相对较好^[9],具有页岩气和常规气的勘探价值。

5 结论

(1)保地1井志留系方解石脉 $\delta^{13}C$ 最小值为 -8.19% ,脉体包裹体群脱硫系数自下而上具有降低的趋势;指示下伏寒武系膏岩层卤水混入导致古流体 SO_4^{2-} 增高,寒武系 TSR 产生的 H_2S 、 CO_2 沿着裂缝系统进入志留系,致使方解石脉碳同位素负偏和钻遇地层气显中发现 H_2S ;方解石中 FeO 、 MnO 组分指示滑脱带附近有古大气水混入。

(2)保地1井龙马溪组底部包裹体以纯水溶

液包裹体为主,结合区域构造演化,较页岩气保存条件优越的川东地区裂缝形成时间早,古流体活动形成的埋深浅、温度低、含气饱和度低。滑脱带附近包裹体均一温度变化范围大,构造活动期次更多、持续时间更长,特别是晚期构造活动更强,成为页岩气逸散的长期通道。

(3)大洪山冲断带发育多个滑脱层的冲断、变形,对多层系页岩气藏和常规气藏破坏较大,油气勘探前景较差。

参考文献:

- [1] 何登发,贾承造.冲断构造与油气聚集[J].石油勘探与开发,2005,32(2):55-62.
HE Dengfa, JIA Chengzao. Thrust tectonics and hydrocarbon accumulation [J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(2): 55-62.
- [2] 张世民,谢富仁,黄忠贤,等.龙门山地区上地壳的拱曲冲断作用及其深部动力学机制探讨[J].第四纪研究,2009,29(3):449-463.
ZHANG Shimin, XIE Furen, HUANG Zhongxian, et al. Bending and thrusting of the upper crust in Longmenshan area and its deep dynamics [J]. Quaternary Sciences, 2009, 29(3): 449-463.
- [3] 段金宝,张庆峰,范小军.大巴山前构造带油气苗分布及油气成藏特征[J].地质科技情报,2016,35(5):163-167.
DUAN Jinbao, ZHANG Qingfeng, FAN Xiaojun. Distribution of oil-gas seepages and characteristics of pool forming at Dabashan piedmont structural belt [J]. Geological Science and Technology Information, 2016, 35(5): 163-167.
- [4] 覃小丽,李荣西,杨玲,等.大巴山陆内造山带高压古流体及其运移动力学机制研究[J].地学前缘,2017,24(2):123-129.
QIN Xiaoli, LI Rongxi, YANG Ling, et al. High pressure paleofluid in the Dabashan intercontinental orogenic belt and its migration dynamics [J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(2): 123-129.
- [5] 周业鑫,丁俊,余谦,等.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[J].地质学报,2017,91(6):1169-1180.
ZHOU Yexin, DING Jun, YU Qian, et al. Geochemical characteristics of fracture fluids in the foreland thrust-fold belt in South Dabashan and structural preservation analysis [J]. Acta Geologica Sinica, 2017, 91(6): 1169-1180.
- [6] 席斌斌,腾格爾,俞俊杰,等.川东南页岩气储层脉体中包裹体古压力特征及其地质意义[J].石油实验地质,2016,38(4):473-479.
XI Binbin, TENGGER, YU Lingjie, et al. Trapping pressure of fluid inclusions and its significance in shale gas reservoirs, southeastern Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(4): 473-479.
- [7] LIU An, OU Wenjia, HUANG Huilan, et al. Significance of paleofluid in the Ordovician-Silurian detachment zone to the preservation of shale gas in western Hunan-Hubei area [J]. Natural Gas Industry B, 2018, 5(6): 565-574.
- [8] 刘安,蔡全升,陈孝红,等.雪峰隆起西缘页岩气构造保存条件的古流体评价[J].大地构造与成矿学,2021,45(6):1161-1173.
LIU An, CAI Quansheng, CHEN Xiaohong, et al. Paleofluid as

- indicator of shale gas tectonic preservation in the western margin of Xuefeng uplift [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2021, 45(6):1161-1173.
- [9] 刘安,周鹏,陈孝红,等.运用方解石脉包裹体和碳氧同位素评价页岩气保存条件:以中扬子地区寒武系为例[J].*天然气工业*,2021,41(2):47-55.
LIU An,ZHOU Peng,CHEN Xiaohong,et al.Evaluation of shale gas preservation conditions using calcite vein inclusions and C/O isotopes:a case study on the Cambrian strata of Middle Yangtze area[J].*Natural Gas Industry*,2021,41(2):47-55.
- [10] 刘安,蔡全升,陈孝红,等.湘西沅麻盆地印支期以来古流体特征及其对寒武系页岩气勘探方向的指示[J].*地球科学*,2021,46(10):3615-3628.
LIU An,CAI Quansheng,CHEN Xiaohong,et al.Paleofluid characteristics since Indosinian movement in Yuanma Basin,west Hunan; significance for Cambrian shale gas exploration[J].*Earth Science*, 2021,46(10):3615-3628.
- [11] 余光春,魏祥峰,李飞,等.上扬子地区断裂活动对页岩气保存的破坏作用[J].*石油实验地质*,2020,42(3):355-362.
YU Guangchun,WEI Xiangfeng,LI Fei,et al.Disruptive effects of faulting on shale gas preservation in Upper Yangtze region[J]. *Petroleum Geology & Experiment*,2020,42(3):355-362.
- [12] 张国伟,程顺有,郭安林,等.秦岭—大别中央造山系南缘勉略古缝合带的再认识:兼论中国大陆主体的拼合[J].*地质通报*,2004,23(9/10):846-853.
ZHANG Guowei,CHENG Shunyou,GUO Anlin,et al.Mianlue paleosuture on the southern margin of the Central Orogenic System in Qinling-Dabie;with a discussion of the assembly of the main part of the continent of China[J].*Geological Bulletin of China*,2004, 23(9/10):846-853.
- [13] LI S Z,ZHAO G C,ZHANG G W,et al.Not all folds and thrusts in the Yangtze foreland thrust belt are related to the Dabie Orogen; insights from Mesozoic deformation south of the Yangtze River[J]. *Geological Journal*,2010,45(5/6):650-663.
- [14] ZHANG Guowei,MENG Qingren,LAI Shaocong.Tectonics and structure of Qinling orogenic belt[J].*Science in China (Series B)*,1995,38(11):1379-1394.
- [15] 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.
- [16] 王凯,刘少峰,姜承鑫,等.扬子板块北缘中段多期褶皱构造的变形特征及叠加关系[J].*大地构造与成矿学*,2015, 39(2):231-240.
WANG Kai,LIU Shaofeng,JIANG Chengxin,et al.Structural style and superposed relationship of multi-period folds in the middle segment of northern Yangtze Block[J].*Geotectonica et Metallogenia*,2015,39(2):231-240.
- [17] RIVERS J M,JAMES N P,KYSER T K.Early diagenesis of carbonates on a cool-water carbonate shelf, southern Australia[J]. *Journal of Sedimentary Research*,2008,78(12):784-802.
- [18] BOLES J R,EICHHUBL P,GARVEN G,et al.Evolution of a hydrocarbon migration pathway along basin-bounding faults; evidence from fault cement[J].*AAPG Bulletin*,2004,88(7):947-970.
- [19] JACOBSEN S B,KAUFMAN A J.The Sr,C and O isotopic evolution of Neoproterozoic seawater[J].*Chemical Geology*,1999, 161(1/3):37-57.
- [20] 曾濞辉,吴琼,杨海军,等.塔里木盆地塔中地区地层水化学特征及其石油地质意义[J].*石油与天然气地质*,2008, 29(2):223-229.
ZENG Jianhui,WU Qiong,YANG Haijun,et al.Chemical characteristics of formation water in Tazhong area of the Tarim Basin and their petroleum geological significance[J].*Oil & Gas Geology*, 2008,29(2):223-229.
- [21] SHAN Xiuqin,ZHANG Baomin,ZHANG Jing,et al.Paleofluid restoration and its application in studies of reservoir forming;a case study of the Ordovician in Tarim Basin,NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*,2015,42(3):301-310.
- [22] 关云梅,王兰生,张鉴,等.四川盆地高含硫气藏地层水地化特征分析[J].*天然气勘探与开发*,2011,34(3):21-23.
GUAN Yunmei,WANG Lansheng,ZHANG Jian,et al.Geochemical characteristics of formation water in high H₂S gas reservoirs, Sichuan Basin[J].*Natural Gas Exploration and Development*, 2011,34(3):21-23.
- [23] 朱光有,张水昌,梁英波.川东北飞仙关组 H₂S 的分布与古环境的关系[J].*石油勘探与开发*,2005,32(4):65-69.
ZHU Guangyou,ZHANG Shuichang,LIANG Yingbo.Relationship between palaeoenvironment and the distribution of H₂S in Feixianguan Formation, NE Sichuan Province [J]. *Petroleum Exploration and Development*,2005,32(4):65-69.
- [24] 陈斐然,段金宝,张汉荣,等.页岩气“压力系数”分级资源评价方法:以川东南上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组为例[J].*石油实验地质*,2020,42(3):405-414.
CHEN Feiran,DUAN Jinbao,ZHANG Hanrong,et al.Shale gas resource evaluation based on“pressure coefficient”:a case study of Upper Ordovician Wufeng-Lower Silurian Longmaxi formations in southeastern Sichuan Basin[J].*Petroleum Geology & Experiment*,2020,42(3):405-414.
- [25] NIE Haikuan,HE Zhiliang,WANG Ruyue,et al.Temperature and origin of fluid inclusions in shale veins of Wufeng-Longmaxi formations,Sichuan Basin,South China; implications for shale gas preservation and enrichment [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*,2020,193:107329.
- [26] 郑冰.中扬子区多源、多期油气成藏地球化学研究[D].成都:成都理工大学,2008:43-54.
ZHENG Bing.Geochemical study of hydrocarbon accumulations with multiple sources and multiple generation stages in the Middle Yangzi area [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2008:43-54.
- [27] 宋庆伟,颜丹平,焦守涛,等.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[J].*地质学报*,2014,88(8):1382-1400.
SONG Qingwei,YAN Danping,JIAO Shoutao,et al.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 [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88(8):1382-1400.
- [28] ZHANG Yuying,HE Zhiliang,JIANG Shu,et al.Fracture types in the Lower Cambrian shale and their effect on shale gas accumulation,Upper Yangtze [J].*Marine and Petroleum Geology*, 2019,99:282-291.