

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.347



渤中凹陷北部陡坡带热液活动及其对湖相碳酸盐岩储层的影响

王清斌^{1,2}, 刘立¹, 牛成民², 臧春艳³, 郝轶伟², 刘晓健², 冯冲², 庞小军²

1. 吉林大学地球科学学院, 吉林长春 130061
2. 中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300452
3. 中海油能源发展股份有限公司渤海实验中心, 天津 300452

摘要: 渤海海域渤中凹陷北陡坡带沙一段发育湖相碳酸盐岩及相关的混积岩类油藏, 探明储量超亿方, 产量高, 埋深超过 3 200~3 800 m. 分析表明: 湖相碳酸盐岩段及混积岩段发生了强烈的白云岩化作用, 溶蚀作用强, 储层物性好, 孔隙度可超过 25%. 早期研究认为生屑的溶蚀是储层物性改善的重要因素. 进一步研究表明, 除了上述因素外, 储层还受到了深部热流体的影响. 通过包裹体激光拉曼分析证实, 储层中存在大量含 CO₂、N₂、H₂S、H₂ 的包裹体, CO₂ 最高含量超过 70%; 研究区多个构造富含 CO₂, 碳同位素及氮同位素显示其为幔源成因; 对储层中大量的自生黄铁矿分析表明, 大部分黄铁矿 Co/Ni 比值大于 1, 显示了热液成因; 在缝洞及大孔隙内沉淀典型微晶鞍形白云石, 具弧形晶面, 波状消光, 扫描电镜下鞍形白云石内见密集的生长纹. 综合分析表明, 富 CO₂ 深部幔源热液侵位时间为 3 Ma 以来, 侵位后造成了白云石晶间残余方解石的大量选择性溶解; 酸性流体对粒内长石也产生了强烈的溶蚀作用, 形成了大量砾石及岩屑的铸模孔并沉淀高岭石, 流体上述溶解作用对储层物性改善起到了决定性影响. 随着方解石及长石的溶解, 流体 PH 值的升高, 盐度的增加, 储层出现明显的白云岩化作用, 晚期白云石的较高的均一温度及鞍形白云石证实了深部热液对白云岩化的贡献. 幔源流体主要来自深大断裂及早期火山后期的排气、排液作用.

关键词: 渤海湾盆地; 渤中凹陷; 幔源流体; 湖相碳酸盐岩; 白云岩化; 鞍形白云石; 石油地质.

中图分类号: P611

文章编号: 1000-2383(2019)08-2751-10

收稿日期: 2018-08-24

The Geological Evidences and Impacts of Deep Thermal Fluid on Lacustrine Carbonate Reservoir in the Actic Area of the North Part of Bozhong Depression, Bohai Bay Basin

Wang Qingbin^{1,2}, Liu Li¹, Niu Chengmin², Zang Chunyan³, Hao Yiwei², Liu Xiaojian², Feng Chong², Pang Xiaojun²

1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China
2. Tianjin Branch of China National Offshore Oil Corporation Ltd., Tianjin 300459, China
3. Bohai Experiment Center, Energy Development Company, CNOOC, Tianjin 300452, China

Abstract: Several high-yielding lacustrine carbonate rock and mix-deposit reservoirs with the total proven reserves of more than 1×10^8 cubic metres have been found in the actic area of the north part of Bozhong depression, with the reservoir depth of 3 200~3 800 meters. The research shows that there are strong dolomitization and dissolution in the lacustrine carbonate rock and mix-deposit rock, and the porosity can be over 25%. Early research suggests that the dissolution of biotritus is the decisive factor to

基金项目: 国家科技重大专项(No. 2016ZX05024-003).

作者简介: 王清斌(1975-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事储层沉积研究工作. ORCID:0000-0003-4900-8700. E-mail: wangqb@cnooc.com.cn

引用格式: 王清斌, 刘立, 牛成民, 等. 2019. 渤中凹陷北部陡坡带热液活动及其对湖相碳酸盐岩储层的影响. 地球科学, 44(8):2751-2760.

improve reservoir physical property. But the further research shows obvious deep thermal fluid activity evidences in this belt, and deep thermal fluid plays a decisive role on forming the high quality reservoirs. Based on the Laser Raman analysis, there are a large number of inclusions which contain CO_2 , N_2 , H_2S and H_2 , and the high content of CO_2 can be over 70%; There are 3 CO_2 -bearing structures found at the Actic Area of Shijiutuo Uplift, the $\delta^{13}\text{C}$ CO_2 values, R/R_a values values show that CO_2 was derived from the mantle. There are a lot of pyrite in the lacustrine carbonate rock, and the Co/Ni ratio of most pyrite is greater than 1, which indicates most of the pyrite derived from the thermal fluid. Saddle dolomite are found at the fractures and big pores, which have the typical arc-shaped crystal and wavy extinction characteristics, and the crystal size is about 0.05~0.10 mm. Dense growth striations are observed under the SEM. According to the thermal history and inclusion homogenization temperature drop points, the thermal fluid activity time is 3~0 Ma. The CO_2 thermal fluid activities produced strong dissolution of calcite cements and feldspars in reservoir, which played an important role on the increasing porosity. With the dissolution of the calcite cements and the volcano lithic fragments and gravels, the PH value and salinity of fluid increased, which resulted in strong dolomitization. The higher inclusion homogenization temperature of late stage dolomite and the saddle-like dolomite show that the thermal fluid promote the dolomitization. The mentle-derived thermal fluid is from the deep fault and the exhaust and drainage of the early volcano.

Key words: Bohai Bay Basin; Bozhong Deprssion; mantle-derived fluids; the lacustrine carbonate; dolomitization; saddle-like dolomite; petroleum geology.

1 地质背景

热液成岩环境是碳酸盐岩领域最为重要的成岩环境之一(黄思静等,2014).近年来,在四川盆地、塔里木盆地都有大量热液白云岩储层的报道(黄思静等,2015).但业界对湖相碳酸盐岩与热液的相关研究较少.渤海湾盆地是中国东部代表性裂陷盆地,深切地幔的郯庐断裂穿过盆地,在断陷期发育大量控盆走滑断裂及深大断裂.研究区渤中凹陷北侧控盆断裂陡坡带从古近系一新近系先后发育沙河街组、东营组、馆陶组、明化镇组地层(夏庆龙等,2012),已钻构造揭示在陡坡带钻遇多个含 CO_2 构造,并有 CFD6-4 和 QHD29-2E 构造钻遇新生界玄武岩(图 1),这些现象表明在研究区有较强烈的火山活动及热液活动.研究区东侧的 QHD29-2E 及 QHD36-3 构造沙一二段发育厚层湖相碳酸盐岩优质储层,单层储层厚度可超过 15 m,湖相碳酸盐叠置在厚层的扇三角洲砂砾岩之上,构成厚层混积岩系,储层总厚度可超过 150 m,测试产能高,可超过 $1\ 000\ \text{m}^3/\text{d}$,总储量超过 $1 \times 10^8\ \text{m}^3$,是渤海近几年在陡坡带的重大勘探突破.这套储层生屑含量高,储层在 3 200 m 以下储层孔隙度可超过 25%.早期研究认为生屑的溶蚀是优质储层形成的主要原因.研究中发现湖相碳酸盐岩段强烈白云岩化,储集空间中除了选择性溶蚀之外岩屑及砾石也有大量的铸模孔发育,岩屑溶蚀孔比例可以超过 30%.是哪些因素导致了储层强烈的白云岩化及强烈的溶蚀作用一直是困扰该区深入研究的关键问题.

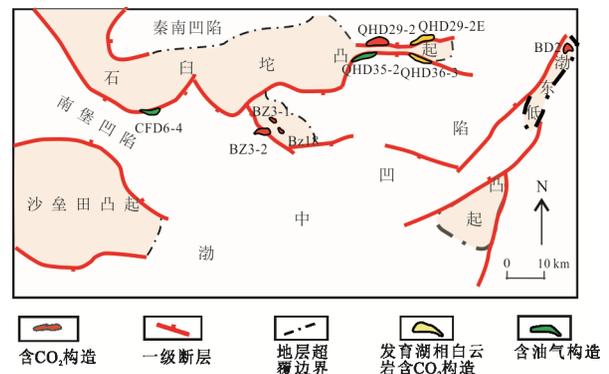


图 1 渤中凹陷北侧陡坡带区域地质概况

Fig.1 Regional geological survey of the Actic area of the north part of Bozhong depression

2 热流体活动的证据

2.1 CO_2 流体来源及活动特征

渤中凹陷北侧陡坡带控盆断裂陡坡带,多个构造已发现 CO_2 气藏,并且 CO_2 含量较高(表 1).其中, QHD29-2 构造 CO_2 含量最高达到 89%,对 CO_2 的同位素分析表明,该构造沙河街组一、二段凝析气藏, CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-5.2\text{‰} \sim -6.4\text{‰}$ (PDB), $\varphi(^3\text{He})/\varphi(^4\text{He})$ 值为 $(5.5 \sim 6.2) \times 10^{-6}$, R/R_a 为 3.9~4.4,具有明显的岩浆—幔源特征.(图 2 右),而湖相碳酸盐岩发育区的 QHD29-2E 构造按照戴金星等(1997)的图版,其投点在无机成因的 CO_2 区,这一点与黄骅凹陷的 $\text{CO}_2\delta^{13}\text{C}$ 值相近,同为无机幔源成因(图 2 左).

研究区湖相碳酸盐岩发育的 QHD29-2E 构造

CO₂含量较低,早期我们认为由于CO₂含量较低其对储层的整体影响较小.但含油气包裹体激光拉曼分析表明,储层包裹体中除了含有大量烃类气体之外,还含有大量CO₂,N₂,H₂等成分.这些包裹体的产状除了赋存在石英加大之外还包括晚期白云石胶结物及方解石胶结物,这说明富CO₂热流体侵位时间较晚.对比QHD29-2构造砂岩储层和QHD29-2E构造白云岩储层,虽然两者含CO₂、H₂包裹体赋存矿物有差别,但都见到了大量高含CO₂、H₂包裹体,这说明这两个相邻构造同样受到CO₂热流体影响.前人研究表明,大量富氢流体往往是幔源成因(金之钧等,2002a,2002b;胡文瑄,2016).另外,前人研究表明,含CO₂包裹体与油气包裹体往往赋存产状相同,两者为同期或近同期(王清斌等,2012).相邻多个构造见大量高含CO₂包裹体,这说明在石臼坨凸起东侧陡坡带是一个幔源流体活跃区,深部热流体活动对区带油气储层的影响,甚至对成藏的影响都十分重要.

2.2 储层中黄铁矿的成分特征

研究区湖相碳酸盐岩储层中含有大量自生黄铁矿,从结晶形态来看有较大差别,包括草莓状及立方体状,产状上主要以粒间充填为主(图3).部分黄铁矿生长在石英次生加大外侧的残余储集空间中(图3).通过电子探针对其成分进行了分析,其Co/Ni比值绝大部分大于1,少部分小于1,有研究表明热液成因的黄铁矿,其Co/Ni比值多大于1,而沉积成因的Co/Ni比值往往小于1(金之钧等,2007).研究区大部分黄铁矿的Co/Ni比值大于1,这说明这些黄铁矿的成因大部分与热液有关(图4).

2.3 晚期鞍状白云石

前人研究表明,在碳酸盐岩储层中,热流体的活动往往会引起热液白云岩化,热液白云岩化往往又表现为大量的鞍形白云石的生成.前人研究表明,这些古生界地层的鞍形白云石晶体往往较大,多超过0.5 mm(黄思静等,2015).部分学者认为在热液与孔隙水混合的背景下也可产生鞍形白云石(张帅等,2016).研究区鞍形白云石整体晶形较小,一般50~100 μm,产状主要以大的裂缝及孔洞充填为主.从其产状判断,其形成在孔隙衬里白云石之后,并且,在其之后不再发育孔隙充填物,因此,推测其形成较晚;另外,通包裹体的分析结果来看,热流体侵位后带来的热波动要超过10℃,这一温度差背景,有利于鞍形白云石的生成.因此,研究区的鞍形白云石应该是热液成因的.薄片观察表明,并不是所有的大孔隙与裂缝中都有鞍形白云石沉淀,当储集空间中有较高含量的高岭石充填往往见不到鞍状白云石沉淀,甚至在同一孔隙中,没有黏土矿物充填一侧有鞍形白云石生长,而高岭石充填一侧没有鞍形白云石生长.另外,在泥晶套内部未见鞍形白云石生长,而鞍形白云石主要生长在孔隙连通性好的空间里,以上两个现象充分说明鞍形白云石在流动性较好的储集空间才能够快速结晶并形成晶面弯曲的结晶形态.受黏土矿物阻隔及受泥晶套屏蔽的储集空间,由于物质交换及流体供给不畅,鞍形白云石很难形成.扫描电镜下,鞍形白云石晶体上见密集的晶体生长纹,可能反映了高温及过饱和条件下鞍形白云石的快速沉淀生长过程,这一点与低温下晶面平直的白云石有较大区别.鞍形白云

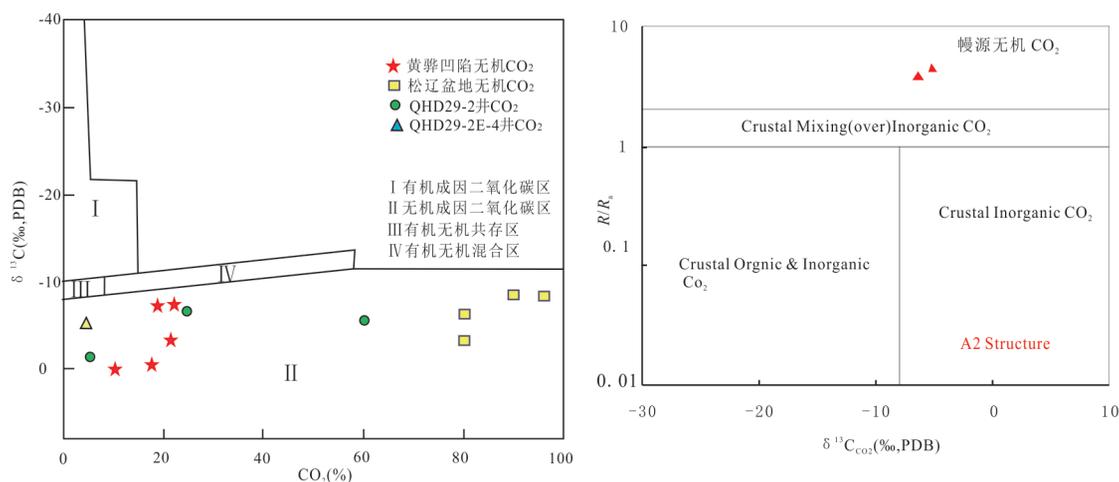


图2 渤中凹陷北侧CO₂成因判别(左:模版据戴金星等,1997;右:模版据胡安平,2009)

Fig.2 Discriminant diagram of CO₂ origin of the north part of Bozhong depression

表 1 渤中凹陷北侧陡坡带各构造 CO₂含量统计表

Table 1 CO₂ content of the Actic area of the north part of Bozhong depression

井号	BD2	QHD29-2-3	QHD29-2-1	BZ15	BZ17	BZ18	BZ3-1-1	BZ3-2-1
CO ₂ 含量	71.3%	89.1%	42.2%	22.8%	17.1%	16.2%	19.6%	19.5%

表 2 渤中凹陷北侧储层中激光拉曼包裹体成分

Table 2 The content of reservoir inclusions of the Actic area of the north part of Bozhong depression

井号	深度(m)	CO ₂	H ₂ S	CH ₄	N ₂	H ₂	宿主矿物
QHD29-2E-5	3 370.05		16.1	20.8	63.1		鲕粒内充填的连晶白云石
QHD29-2E-5	3 382.10			35.7		64.3	砾石填隙物中的第三世代衬垫白云石
QHD29-2E-5	3 383.10	78.1		21.9			粒间孔隙充填白云石胶结物
QHD35-2-3	3 327.93	72.9		3.8	23.3		交代颗粒的方解石胶结物
QHD35-2-3	3 320.80	51.4		26.9		21.7	石英加大
QHD35-2-3	3 478.18	76.3	8.4			15.4	石英加大
QHD29-2-2	3 321.40			23.0		77.0	石英加大
QHD29-2-2	3 322.40			57.0		43.0	石英加大
QHD29-2-2	3 328.00	80.8		19.2			石英加大
QHD29-2E-4	3 454.98	51.2		7.3	41.5		石英加大

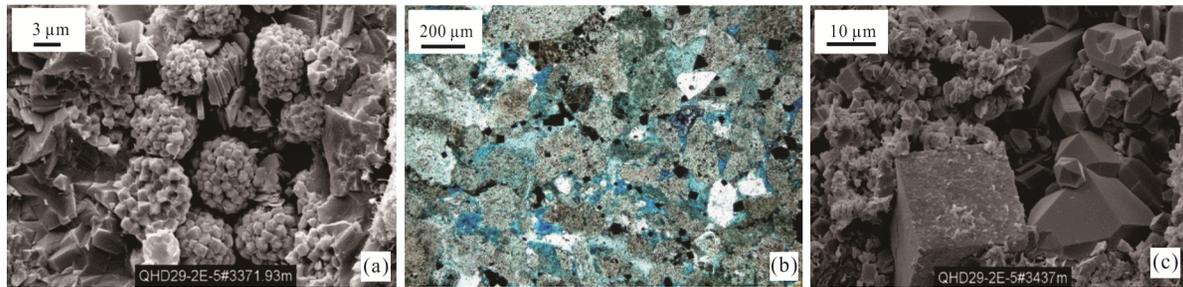


图 3 储层中黄铁矿的形态与产状

Fig.3 The shape and occurrence of reservoir pyrite

a. 草莓状黄铁矿, QHD29-2E-5 井, 扫描电镜, 3 371.93 m; b. 粒间充填大量黄铁矿, 铸体薄片 QHD29-2E-5 井, 3 371.93 m; c. 立方体状黄铁矿, 生长在石英加大充填的残余储集空间中, 扫描电镜 3 437.00 m

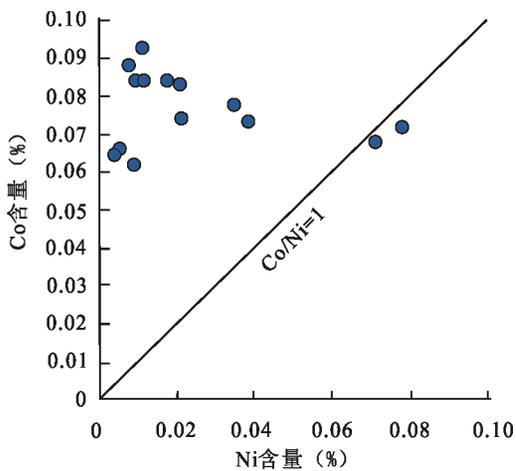


图 4 储层中黄铁矿 Co/Ni 比值

Fig.4 The ratio of Co/Ni of pyrites

石沉淀生长在孔隙裂缝的最内侧, 说明其结晶时间最晚, 是晚期热液活动的典型标志, 这一点与前人研究成果是一致的, 前人研究表明, 石臼坨凸起东侧陡坡带 CO₂ 流体的活动事件与油气成藏时间接近, 为 3 Ma 左右 (Zhou *et al.*, 2012). 鞍形白云石的发现进一步证实了储层经历了热流体活动, 并伴生了热液白云岩化作用. 研究区鞍形白云石晶粒整体较小, 这可能与热流体活动时间较晚有关, 缺乏热流体长期不断大量补给的条件, 另外, 可能与烃类在矿物表面形成的油膜有关, 油膜限制了鞍形白云石的结晶. 由于晶粒小, 包裹体测温并没有获得成功 (图 5).

2.4 包裹体测温证据

热流体侵位会给储层带来明显的热扰动, 而这

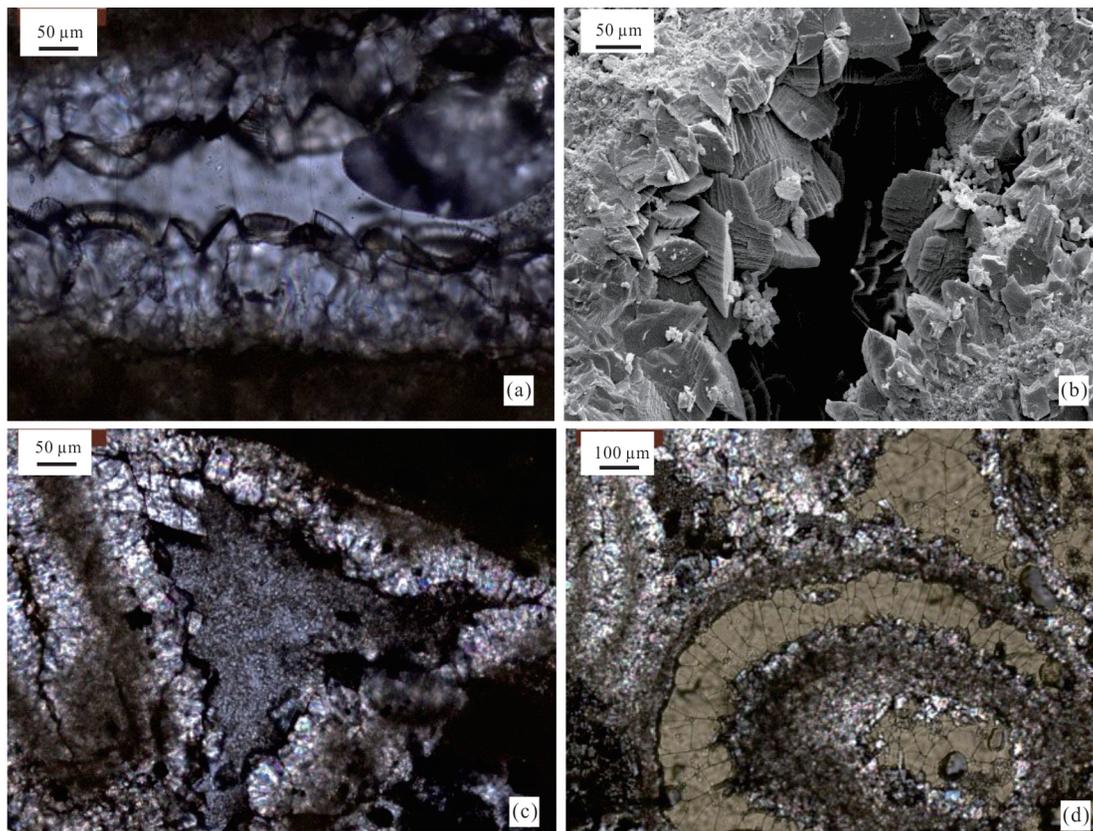


图 5 鞍形白云石形态及产状(QHD29-2E-5井)

Fig.5 The shape and occurrence of the saddle dolomite

a. 充填在大孔隙中的鞍形白云石,薄片,3 380.35 m; b. 扫描电镜下的鞍形白云石, 3 377.49 m; c. 高岭石充填孔隙边缘未见鞍形白云石,薄片,3 380.35 m; d. 泥晶套内的生屑铸模孔未见鞍形白云石,薄片,3 380.35 m

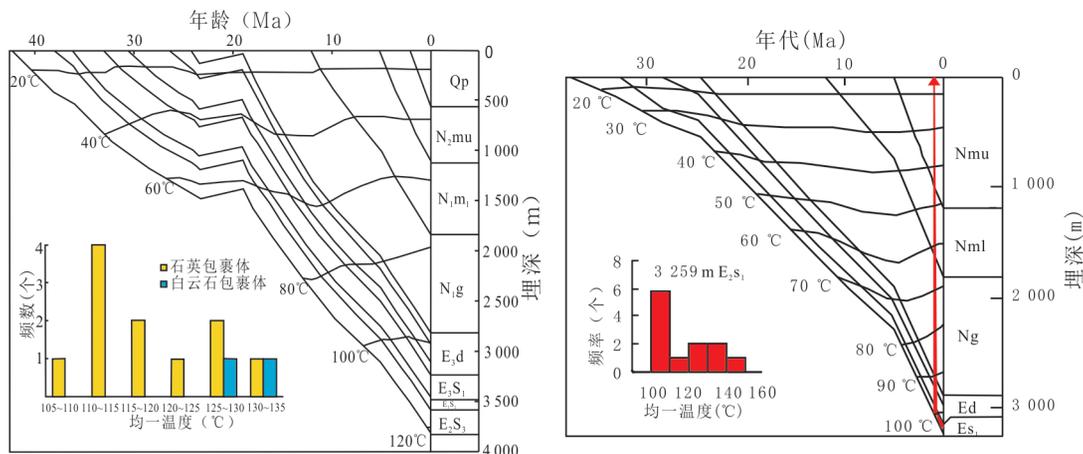


图 6 渤中凹陷北侧陡坡带重点井成藏史与热史(左:QHD29-2E构造,3 380.85 m;右:QHD29-2构造,3 259.00 m)

Fig.6 The accumulation history and the thermal history of key wells at the actic area of the north part of Bozhong depression

些热异常很多时候会被包裹体所记录,表现为与地质背景异常的高均一温度.研究区东营组沉积末期以来一直处于持续沉降阶段,现今埋深是地层最大埋深,现今的地层在 3 300~3 400 m 地层温度为

110~115 °C,但与油气包裹体伴生的盐水包裹体均一温度却出现了大量接近 130 °C 的高温包裹体,高于现今地层温度 10 °C 以上.这些现象说明,富含 CO₂ 的热流体的侵位在储层内形成了明显的热扰

动,并被石英加大和碳酸盐矿物包裹体所记录.

3 热液运移及白云岩化模式

对于热液流体的来源,有学者认为与中生界火山岩的二次释气作用有关,有的认为与深大断裂沟通深部热液有关(胡安平等,2009).QHD29-2E构造沙二段沉积早期沿着边界深大断裂发生过较大规模的火山喷发,并被5井所钻遇,玄武岩厚度达50 m.玄武岩喷发后即进入较长时间的喷发间歇期,在间歇期是排液,排气的主要阶段,而这些流体应是热流体的重要来源之一.根据围区CO₂同位素资料,CO₂是典型的幔源成因,因此,本文认为研究区深大断裂与中下地壳岩浆房沟通,这条深大断裂不仅是岩浆的重要通道,也是后期热流体的重要通道.在岩浆活动间歇期热流体沿着大断裂运移,最终在盖层条件较好的油气圈闭内侵位聚集(图6).

热流体侵位后带来了明显的白云岩化作用,由于湖相碳酸盐岩的分布主要为几米至几十米的层状,并发育在大套渗透性较好的砂砾岩之上,流体可以在储层内充分流动,因此,后期的白云岩化作用也主要集中于湖相碳酸盐岩发育段,这一点与海相碳酸盐岩的构造白云岩产状有很大差别(图7).

4 热流体对储层的影响

4.1 溶蚀作用的选择性

前人研究表明与碎屑岩相比,碳酸盐岩更易受到后期流体的影响(李忠等,2018).研究区在湖相碳酸盐岩发育段,储层中的溶蚀现象是非常强烈的(解习农等,2018),既包括典型的大气水成因的选择性溶解作用,也包括非选择性大面积的溶蚀现象,另外,与传统的碎屑岩相比,其陆源岩屑的溶蚀强烈,形成了在泥晶套保护之下的大量岩屑铸模孔及砾石内部的溶蚀孔,岩屑强烈的溶蚀对储层物性起到了决定性的影响.早期研究中我们更多把这些现象归结为有机酸的溶蚀作用,但由于有机酸的溶解能力强,在模拟实验中有有机酸对各类碳酸盐矿物均具有很强的溶蚀能力(黄思静,2012),但在薄片观察中可见到大量的泥晶套及后期环边及孔隙衬里早期晶面平直白云石大量保存,显而易见,溶蚀具有明显的选择性.结合前文CO₂热流体活动的证据,我们认为只有CO₂侵位带来的热流体才能形成对碳酸盐矿物的复杂溶蚀与沉淀关系.前人研究表

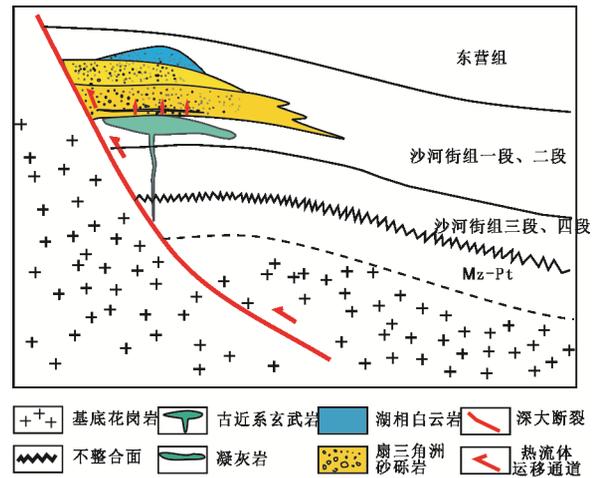


图7 渤中凹陷北侧陡坡带热液的运移及湖相碳酸盐白云岩化模式

Fig.7 The models of the migration of thermal fluid and dolomitization of the lacustrine carbonate at the active area of the north part of Bozhong depression

明,岩浆成因的热流体具有较高的盐度和CO₂,碳酸盐岩地层水具有相对较低的盐度和CO₂,即使两者对碳酸盐岩都是饱和的,当两者混合时仍可以形成对碳酸盐岩不饱和的流体,从而形成强烈的溶解作用(Corbella *et al.*, 2003).

通过薄片观察,与白云石大量保存不同,储层中很少见到方解石,在部分深度见到溶蚀残余的方解石,其外侧被早期晶面平直白云石所包围(图8a, 8b),方解石溶蚀部分,显示大量孔隙衬里储集空间重新开启(图8b, 8c).根据这些现象,我们认为早期储层中可能有较高含量的方解石胶结物,在后期流体的溶蚀作用下重新开启,这一作用对储层的形成是决定性的.

岩屑与砾石的强烈溶蚀作用本质是长石的溶蚀作用,前人对CO₂溶蚀改造储层研究较多,大家普遍认为CO₂侵位会带来强烈的长石溶解作用,并产生次生孔隙(曾溅辉,2000;刘立等,2009;曲希玉等,2009).在有大量碳酸盐矿物缓冲的条件下,长石的溶蚀条件业界还没有相关文献报道,但强烈的溶蚀的确在研究区湖相碳酸盐岩段发生,并生成大量自生高岭石(图8d, 8e, 8f).对碳酸盐岩中的高岭石有学者认为可以作为酸性流体活动的标志,并广泛发育在塔里木深层碳酸盐岩储层中(黄思静等,2012).研究区高岭石晶型完整,具备埋藏溶蚀高岭石的特点,含量较高与大面积的岩屑及砾石的溶蚀相对应,其成因归结为热流体对长石的溶蚀是合理

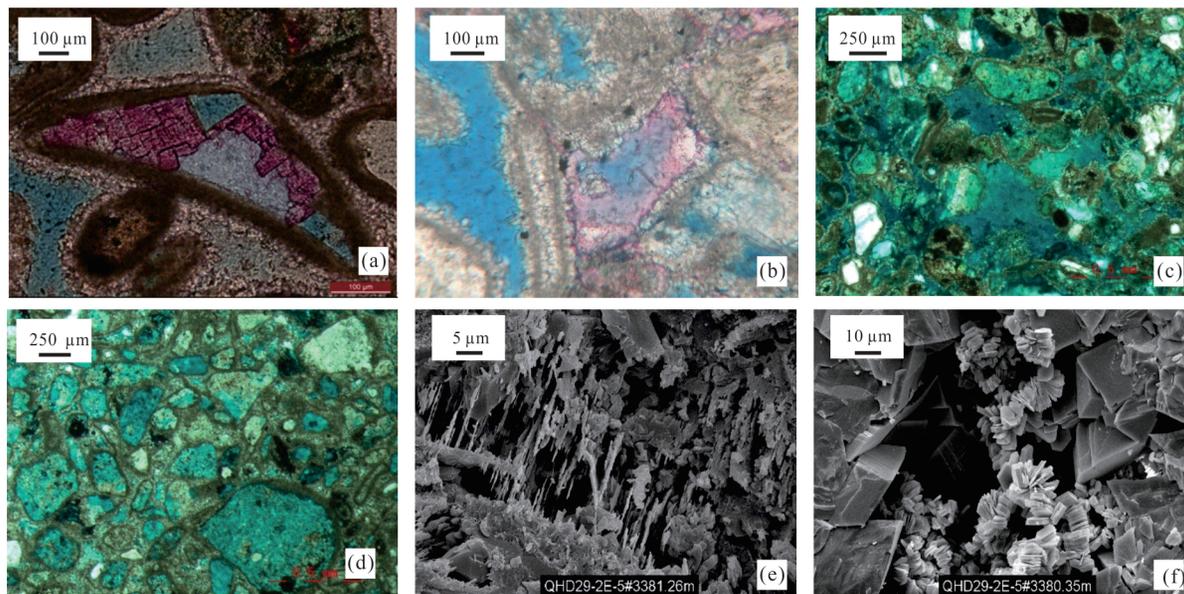


图 8 湖相碳酸盐岩储层的溶蚀作用

Fig.8 The dissolution of lacustrine carbonate rock reservoir

a. 方解石溶蚀残余,白云石泥晶套保存完整,QHD36-3-2,铸体薄片,3 763.83 m;b. 方解石溶蚀残余,周边孔隙发育,QHD29-2E-5井,铸体薄片,3 362.00 m;c. 薄片下未见方解石胶结物,孔隙发育,泥晶套保留,岩屑和砾石铸模孔发育,QHD29-2E-5井,铸体奥片,3 376.55 m;d. 大量泥晶套保留并搭成格架,砾石铸模孔发育,砾石大部分被溶蚀,未见方解石,QHD29-2E-5井,铸体薄片,3 377.49 m;e. 长石的强烈溶解,仅残余部分矿物格架,QHD29-2E-5井,扫描电镜,3 380.35 m;f. 白云石环边的残余孔隙内,书页状自生高岭石发育,QHD29-2E-5井,扫描电镜,3 381.26 m.

的. 储层方解石含量极低,强烈的溶蚀可能是在方解石被溶蚀完全,不具备缓冲能力时, CO_2 流体对长石矿物溶蚀形成的. 在相邻的秦皇岛 29-2 构造,由于没有方解石胶结物的缓冲,或者方解石胶结物被溶蚀殆尽, CO_2 流体对长石矿物产生了强烈的溶蚀作用,很多长石形成铸模孔,并生成大量自生高岭石(王清斌等,2012),这一点与研究区的湖相碳酸盐岩与碎屑岩混积岩段可以很好类比.

随着方解石及长石的溶蚀,流体盐度升高,pH 值升高,尤其是火山岩岩屑及砾石的溶蚀可以让孔隙水中 Mg^{2+} 离子升高,并促进白云岩化,由此形成了自生高岭石与白云岩化共存的现象. 另外,早期泥晶套等富含有机质并与微晶白云石结合成了相对稳定的复合体(毕义泉等,2001),后期酸性流体对其溶蚀受到较大制约,因此,在方解石大量溶解的同一视域内可观察到泥晶套保存完整,受溶蚀作用的影响小(图 8a,8b,8d).

4.2 热流体活动与白云岩化作用

研究区湖相碳酸盐储层中含有多种类型的白云石,包括早期泥晶白云石及泥晶套,中早期的晶面平直白云石,后期的粒间非平直晶面白云石以及

前文提到的鞍形白云石. 鞍形白云石的出现是热液白云岩的标志(黄思静,2012),但鞍形白云石晶粒小,分布局限,对于热液白云岩化的规模和影响程度通过鞍形白云石很难判断. 另外,研究区热流体富含 CO_2 ,对于富含 CO_2 的热流体,其特点在于其早期强烈的溶解作用,其后才是白云岩化及白云石的沉淀作用. 塔里木盆地深层有大量与火山相伴随的富 CO_2 热流体活动的证据,近几年一部分学者注意到富 CO_2 热流体与其他卤水流体的差异性,提出富 CO_2 流体的先溶蚀,后白云岩化的认识(刘伟等,2016). 本文通过包裹体手段,对热流体相关的白云石开展了系列工作. 研究证实最晚一期孔隙衬里白云石内部的盐水包裹体温度为 $102\sim 105\text{ }^\circ\text{C}$,与地层成岩演化背景相符,其应该形成于成岩期,是深埋阶段的埋藏白云石. 对于粒间充填的非平直晶面白云石,早期我们认为主要是高成岩阶段的埋藏白云石,但对其进一步研究表明,其内部富含包裹体,包裹体均一温度可超过 $130\text{ }^\circ\text{C}$,普遍高于现今地层温度,具有明显的热液白云岩的特点,这说明在热流体侵位后储层进一步白云岩化,部分孔隙在白云岩化过程中被堵塞具有过白云岩化特点.

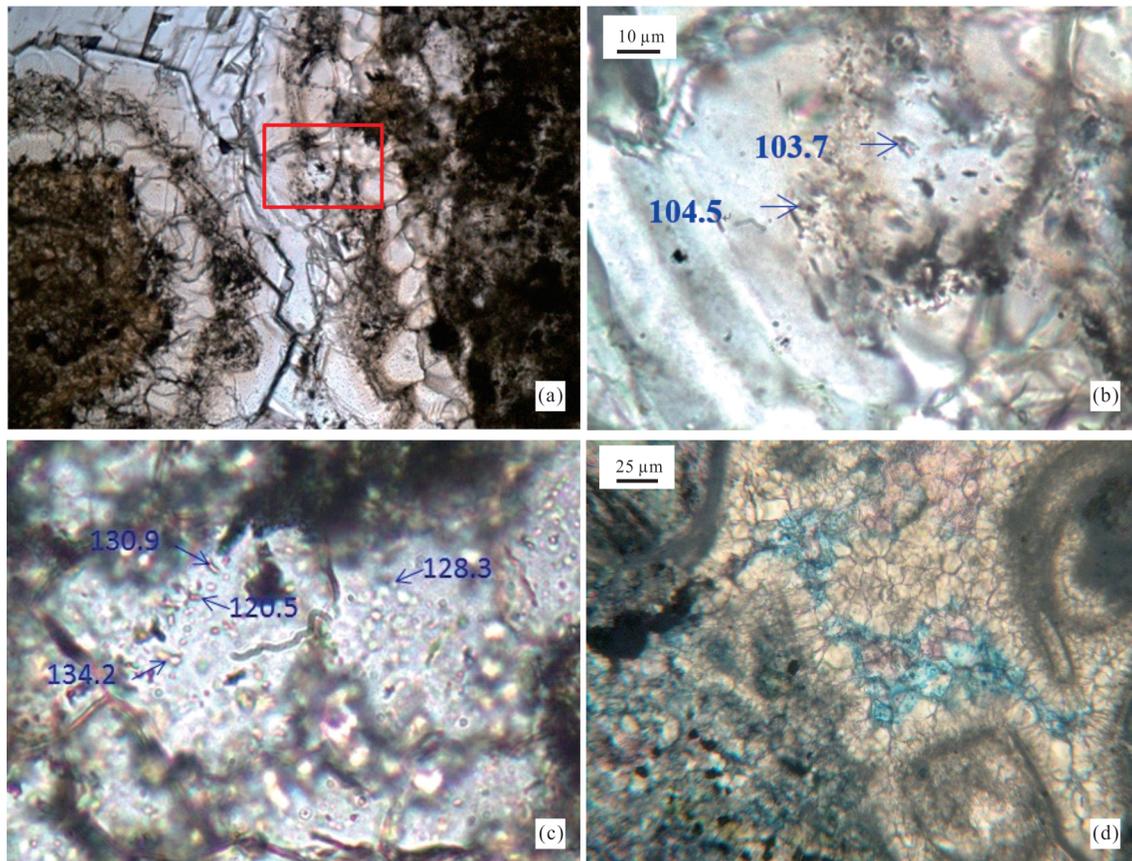


图9 不同类型白云石包裹体均一温度及产状

Fig.9 The homogenization temperature and occurrence of inclusions of dolomite

a. 孔隙衬里白云石, QHD29-2E-5井, 3 384.38 m; b. 孔隙衬里白云石中的包裹体, 图a的局部放大(红色方框内); c. 非平直晶面白云石包裹体, QHD29-2E-5井, 3 368.41 m; d. 非平直晶面白云石和铁白云石大量充填孔隙, 显示过度白云岩化特点, QHD29-2E-5井, 3 395.00 m.

5 结论

(1) 研究区发育多个含 CO_2 构造, 多个构造钻遇新生界火山岩, CO_2 同位素及 He 同位素表现为明显的幔源特征, 幔源含 CO_2 热流体主要来自深大断裂及早期火山后期的排气、排液作用。

(2) 发育湖相碳酸盐岩构造紧邻控盆深大断裂, 早期地层见厚层玄武岩, 后期叠置发育湖相碳酸盐岩及混积岩。深部热液在上覆的湖相碳酸盐岩及混积岩储层中保留了大量热液活动的证据: 储层中见到大量高含 CO_2 的包裹体; 储层中大部分黄铁矿的 Co/Ni 比值大于 1; 储层中见到典型的热液成因的鞍形白云石; 包裹体中存在大量高于现今地层温度的包裹体。

(3) CO_2 流体的侵位对储层中矿物的溶蚀表现为较大的选择性。 CO_2 酸性流体造成了储层中方解石的溶蚀, 重新开启孔隙; 对火山岩岩屑、砾石中的长石的强烈溶蚀, 形成大量岩屑、砾石粒内孔和铸

模孔, 并形成大量自生高岭石; 但 CO_2 酸性流体对早期的泥晶白云石以及泥晶套并没有表现出明显的溶蚀作用。

(4) 含 CO_2 流体对方解石和长石的溶解使孔隙水 pH 值升高, 盐度升高, 尤其是火山岩屑和砾石的 Mg^{2+} 离子大量迁入促进了储层的进一步白云岩化, 一方面表现为鞍形白云石的生成, 另一方面, 粒间充填的非平直晶面白云石中的包裹体均一温度高于现今地层温度, 部分孔隙在白云岩化过程中被堵塞具有过白云岩化特点。

References

- Bi, Y.Q., Tian, H.Q., Zhao, Y.H., et al., 2001. On the Micrite Envelope to Restoration of Primary Texture Character of Secondary Dolomites and Its Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 17(3):491–496 (in Chinese with English abstract).
- Corbella, M., Ayora, C., Cardellach, E., 2003. Dissolution of Deep Carbonate Rocks by Fluid Mixing: A Discussion

- Based on Reactive Transport Modeling. *Journal of Geochemical Exploration*, 78–79: 211–214. [https://doi.org/10.1016/s0375-6742\(03\)00032-3](https://doi.org/10.1016/s0375-6742(03)00032-3)
- Dai, J.X., Fu, C.D., Guan, D.F., et al., 1997. New Progress on Natural Gas. Petroleum Industry Press, Beijing, 203–206 (in Chinese with English abstract).
- Hu, A. P., Dai, J. X., Yang, C., et al., 2009. Geochemical Characteristics and Distribution of CO₂ Gas Fields in Bohai Bay Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 36(2): 181–189. [https://doi.org/10.1016/s1876-3804\(09\)60118-x](https://doi.org/10.1016/s1876-3804(09)60118-x)
- Hu, W.X., 2016. Origin and Indicators of Deep-Seated Fluids in Sedimentary Basins. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 35(5): 817–825 (in Chinese with English abstract).
- Huang, S.J., 2012. Carbonate Diagenesis. Geological Publishing House, Beijing, 110–145 (in Chinese with English abstract).
- Huang, S.J., Cheng, X.Y., Zhao, J., et al., 2012. Test on Dolomite Dissolution under Subaerial Temperature and Pressure. *Carsologica Sinica*, 31(4): 350–360 (in Chinese with English abstract).
- Huang, S.J., Hu, Z.W., Zhong, Y.J., et al., 2015. Saddle Dolomite in Permian-Triassic Carbonate Rocks and Sandstones of Sichuan Basin: Petrology, Formation Temperature and Palaeofluids. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 42(2): 129–148 (in Chinese with English abstract).
- Huang, S.J., Lan, Y.F., Huang, K.K., et al., 2014. Vug Fillings and Records of Hydrothermal Activity in the Middle Permian Qixia Formation, Western Sichuan Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 30(3): 687–698 (in Chinese with English abstract).
- Jin, Z.J., Hu, W.X., Zhang, L.P., et al., 2007. Deep Fluid Activities and Effectiveness on Oil/Gas Reservoir Formation, Science Press, Beijing, 124–126 (in Chinese with English abstract).
- Jin, Z.J., Yang, L., Zeng, J.H., et al., 2002a. Deep Fluid Activities and Their Effects on Generation of Hydrocarbon in Dongying Depression. *Petroleum Exploration and Development*, 29(2): 42–44 (in Chinese with English abstract).
- Jin, Z.J., Zhang, L.P., Yang, L., et al., 2002b. Primary Study of Geochemical Features of Deep Fluids and Their Effectiveness on Oil/Gas Reservoir Formation in Sedimentary Basins. *Earth Science*, 27(6): 659–665 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z., Luo, W., Zeng, B.Y., et al., 2018. Fluid-Rock Interactions and Reservoir Formation Driven by Multiscale Structural Deformation in Basin Evolution, *Earth Science*, 43(10): 3498–3510 (in Chinese with English abstract).
- Liu, L., Zhu, D.F., Qu, X.Y., et al., 2009. Impacts of Mantle-Genetic CO₂ Influx on the Reservoir Quality of Lower Cretaceous Sandstone from Wuexun Depression, Hailaer Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 25(10): 2311–2319 (in Chinese with English abstract).
- Liu, W., Huang, Q. Y., Wang, K., et al., 2016. Characteristics of Hydrothermal Activity in the Tarim Basin and Its Reworking Effect on Carbonate Reservoirs. *Natural Gas Industry*, 3(3): 202–208 (in Chinese with English abstract).
- Qu, X.Y., Liu, L., Ma, R., et al., 2008. Experiment on Debris-Arkosic Sandstone Reformation by CO₂ Fluid. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 38(6): 959–964 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Q.B., Zang, C.Y., Zhu, W.S., et al., 2012. The Impact of Mantle Source CO₂ on Clay Minerals of Clastic Reservoirs in the East Part of Shijiutuo Symon Fault, Bozhong Depression. *Acta Petrologica et Mineralogical*, 31(5): 674–679 (in Chinese with English abstract).
- Xia, Q.L., Zhou, X.H., Li, J.P., et al., 2012. The Sedimentary Evolution and Distribution of Paleogene Sequence in the Bohai Sea Area. Petroleum Industry Press, Beijing, 10–20 (in Chinese with English abstract).
- Xie, X.N., Ye, M.S., Xu, C.G., et al., 2018. High Quality Reservoirs Characteristics and Forming Mechanisms of Mixed Siliciclastic-Carbonate Sediments in the Bozhong Sag, Bohai Bay Basin. *Earth Science*, 43(10): 3526–3539 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, J.H., 2000. Thermal Fluid Activities and Their Effects on Water Rock Interaction in Dongying Sag. *Earth Science*, 25(2): 133–136 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S., Xia, G.Q., Yi, H.S. et al., 2016. Origin of Saddle Dolomites from the Buqu Formation of Longeni Area in Southern Qiangtang Basin. *Oil & Gas Geology*, 37(4), 483–489 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, X. H., Wang, Q. B., Li, J. P., et al., 2012. Impact of Late-Accumulated Mantle-Derived CO₂ on Quality of Paleogene Clastic Reservoir at Actic Area, Qin Nan Sag. *Energy Exploration & Exploitation*, 30(2): 295–309. <https://doi.org/10.1260/0144-5987.30.2.295>

附中文参考文献

- 毕义泉, 田海芹, 赵勇生, 等, 2001. 论泥晶套与次生白云岩原岩结构特征的恢复及意义. *岩石学报*, 17(3): 491–496.

- 戴金星,傅诚德,关德范,等,1997.天然气地质研究新进展.北京:石油工业出版社,203—206.
- 胡安平,戴金星,杨春等,2009.渤海湾盆地CO₂气田(藏)地球化学特征及分布.石油勘探与开发,36(2):181—189.
- 胡文瑄,2016.盆地深部流体主要来源及判识标志研究.矿物岩石地球化学通报,35(5):817—825.
- 黄思静,成欣怡,赵杰,等,2012.近地表温压条件下白云岩溶解过程的实验研究.中国岩溶,31(4):350—360.
- 黄思静,胡作维,钟怡江,等,2015.四川盆地二叠—三叠系碳酸盐岩和砂岩中的鞍形白云石—岩石学、形成温度与流体.成都理工大学学报(自然科学版),42(2):129—148.
- 黄思静,兰叶芳,黄可可,等,2014.四川盆地西部中二叠统栖霞组晶洞充填物特征与热液活动记录.岩石学报,30(3):687—698.
- 黄思静,2012.碳酸盐岩成岩作用.北京:地质出版社,110—145.
- 金之钧,杨雷,曾溅辉,等,2002a.东营凹陷深部流体活动及其生烃效应初探.石油勘探与开发,29(2):42—44.
- 金之钧,张刘平,杨雷,等,2002b.沉积盆地深部流体的地球化学特征及油气成藏效应初探.地球科学,27(6):659—665.
- 金之钧,胡文瑄,张刘平,等,2007.深部流体活动及油气成藏效应.北京:科学出版社,124—126.
- 李忠,罗威,曾冰艳,等,2018.盆地多尺度构造驱动的流体—岩石作用及成储效应.地球科学,43(10):3498—3510.
- 刘立,朱德丰,曲希玉,等,2009.海拉尔盆地乌尔逊凹陷幔源CO₂充注对下白垩统砂岩储集层质量的影响.岩石学报,25(10):2311—2319.
- 刘伟,黄擎宇,王坤等,2016.塔里木盆地热液特点及其对碳酸盐岩储层的改造作用.天然气工业,36(03):14—21.
- 曲希玉,刘立,马瑞,等,2008.CO₂流体对岩屑长石砂岩改造作用的实验.吉林大学学报(地球科学版),38(6):959—964.
- 王清斌,臧春艳,朱文森,等,2012.渤中坳陷石臼坨凸起东段幔源CO₂充注对储集层黏土矿物的影响.岩石矿物学杂志,31(5):674—679.
- 夏庆龙,周心怀,李建平等,2012.渤海海域古近系层序沉积演化机储层分布规律.北京:石油工业出版社,10—20.
- 解习农,叶茂松,徐长贵,等,2018.渤海湾盆地渤中凹陷混积岩优质储层特征及成因机理.地球科学,43(10):3526—3539.
- 曾溅辉,2000.东营凹陷热流体活动及其对水岩相互作用的影响.地球科学,25(2):133—136.
- 张帅,夏国清,伊海生等,2016.羌塘盆地南部鄂尼地区布曲组鞍形白云石成因.石油与天然气地质,37(4):483—489.