

# 渤中坳陷石臼陀凸起东段幔源 CO<sub>2</sub> 充注对 储集层粘土矿物的影响

王清斌<sup>1</sup> 臧春艳<sup>2</sup> 朱文森<sup>1</sup> 赵国祥<sup>1</sup> 袁志刚<sup>2</sup> 冯冲<sup>1</sup>

(1. 中海石油(中国)有限公司天津分公司 渤海油田勘探开发研究院,天津 300452;  
2. 中海油能源发展股份有限公司 采油工程研究院,天津 300452)

**摘要:**探讨了渤中坳陷石臼陀凸起东段 CO<sub>2</sub> 来源及 CO<sub>2</sub> 充注对储层粘土矿物的影响。研究表明,CO<sub>2</sub> 中 δ<sup>13</sup>C 组成较重, R/Ra 值较大, CO<sub>2</sub> 为幔源成因, 控盆的深大断裂是 CO<sub>2</sub> 的主要运移通道, CO<sub>2</sub> 热流体晚期充注对砂岩储集层粘土矿物产生了明显的影响。CO<sub>2</sub> 热流体侵位后形成的热波动效应加快了储集层中伊蒙混层粘土的演化, 含 CO<sub>2</sub> 储集层中伊蒙混层中蒙脱石含量要比同深度的泥岩低 15%~30%; CO<sub>2</sub> 热流体晚期侵入加剧了长石的溶蚀作用, 长石溶蚀促进了自生高岭石的大量形成, CO<sub>2</sub> 热流体侵位后形成的偏酸性环境抑制伊利石生长, 促进了其他粘土矿物向高岭石转化, 含 CO<sub>2</sub> 储集层以少见的高自生高岭石、低伊利石为特征, 这对储层物性改善起到了决定性的影响。

**关键词:**幔源 CO<sub>2</sub> 碎屑岩储集层; 粘土矿物; 渤中坳陷

中图分类号: TE122; P578.964

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2012)05-0674-07

## The impact of mantle source CO<sub>2</sub> on clay minerals of clastic reservoirs in the east part of Shijiutuo symon fault, Bozhong depression

WANG Qing-bin<sup>1</sup>, ZANG Chun-yan<sup>2</sup>, ZHU Wen-sen<sup>1</sup>, ZHAO Guo-xiang<sup>1</sup>, YUAN Zhi-gang<sup>2</sup>  
and FENG Chong<sup>1</sup>

(1. Exploration and Development Research Institute of Bohai Oil Field, Tianjin Branch of CNOOC, Tianjin 300452, China;  
2. Production Engineering Research Institute of Energy Development, CNOOC, Tianjin 300452, China)

**Abstract:** The origin of CO<sub>2</sub> and the alteration of CO<sub>2</sub> into clay minerals in eastern Shijiutuo symon fault of Bozhong depression were studied in this paper. The elevated δ<sup>13</sup>C and R/Ra values show the mantle-derivation of CO<sub>2</sub>. The basin-controlling deep fault was the main migration pathway of CO<sub>2</sub> fluid. CO<sub>2</sub> fluid injection had obvious impact on clay minerals. CO<sub>2</sub> late injection caused obvious thermal fluctuation and brought out the result that the montmorillonite of the illite/montmorillonite mixing layer was 15%~30% lower than that of mudstone at the nearby depth. Because of late accumulation of CO<sub>2</sub>, acidic environment of reservoir bed lasted for a long time, which promoted dissolution of feldspar and formation of kaolinite. Acidic environment inhibited illite in favor of the transform of other clay minerals into kaolinite. The CO<sub>2</sub>-bearing reservoir bed was characterized by high authigenic kaolinites and low illite, which played a decisive role in reservoir quality improvement.

**Key words:** mantle source CO<sub>2</sub>; clastic reservoir; clay mineral; Bozhong depression

中国东部含油气盆地已发现了 32 个 CO<sub>2</sub> 气藏 (曲希玉等 2008)。目前,对 CO<sub>2</sub> 气藏的研究多侧重于 CO<sub>2</sub> 成因研究、CO<sub>2</sub> 成藏研究以及与 CO<sub>2</sub> 伴生的片钠铝石的岩石学特征、成因机理研究(刘立等,

收稿日期: 2012-03-26; 修订日期: 2012-07-24

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX05023-001-004)

作者简介: 王清斌(1975-),男,硕士,工程师,沉积与储层地质专业, E-mail: wangqb@cnooc.com.cn.

2009) , 而含 CO<sub>2</sub> 储集层粘土矿物特征及 CO<sub>2</sub> 热流体侵位对粘土矿物的影响则很少有人涉及。作为典型的地质“事件”, CO<sub>2</sub> 流体充注对储集层中粘土矿物的影响作用具有代表性, 对这些影响作用的研究可以揭示该类事件与碎屑岩相互作用机制, 对深层优质储层预测具有重要指导意义。研究区渤中坳陷石臼陀凸起东段含 CO<sub>2</sub> 储层埋深大, 为渤海湾盆地典型的晚期快速成藏油气藏, 油气及 CO<sub>2</sub> 流体充注均较晚, 较短的成藏时间使砂岩储层受幔源 CO<sub>2</sub> 流体改造影响明显( Zhou *et al.* , 2012) , 是开展 CO<sub>2</sub> 流体对粘土矿物研究的理想区块, 本文即探讨了渤中坳陷石臼陀凸起东段 CO<sub>2</sub> 来源及 CO<sub>2</sub> 充注对储层粘土矿物的影响。

## 1 地质概况

渤中坳陷位于渤海湾盆地中部, 是渤海海域重要的生烃坳陷, 古近系和新近系是重要的油气勘探目的层系。石臼陀凸起是渤中坳陷二级构造单元, 位于渤中凹陷和秦南凹陷之间, 近东西向, 东西两侧与辽西低凸起和马头营凸起以鞍部过渡( 翟光明等, 2002) 。 A2 及 A2E 构造位于石臼陀凸起北侧边界断裂下降盘, 南依石臼陀凸起, 北邻秦南凹陷, 紧邻秦南凹陷边界大断层( 图 1) 。这两个构造沙河街组一、二段埋深超过 3 200 m, 钻探揭示为富含 CO<sub>2</sub> 气的构造层状凝析气藏。

## 2 样品采集及测试方法

在对 A2 构造 4 口井的测井、试油等资料分析的基础上, 先后采集了 64 件含 CO<sub>2</sub> 储层段砂岩岩芯、

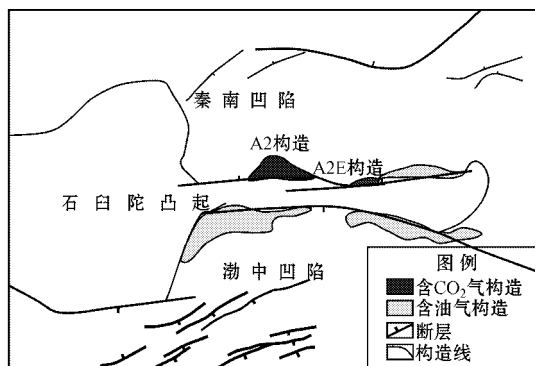


图 1 A2 构造区域地质概况

Fig. 1 Regional geology of A2 structure

壁芯样品, 切制了 60 余片铸体薄片。对 16 件样品进行了扫描电镜分析, 落实储层粘土矿物类型和特征, 对 20 件进行了 X 射线衍射粘土分析, 确定粘土矿物含量, 同时选择了相近深度泥岩样品也进行了粘土矿物分析, 以对比两者的差异。还对岩心和壁心进行了孔隙度和渗透率测定。孔隙度、渗透率、薄片、扫描电镜、X 衍射在中海油能源发展股份有限公司采油工程研究院完成。

选择含 CO<sub>2</sub> 气储层段砂岩样品切制了 7 片包裹体薄片, 对流体包裹体进行了均一温度测试, 落实含 CO<sub>2</sub> 气储层段包裹体特征。测试工作在中国核工业部北京地质研究院分析测试研究中心流体包裹体实验室完成。

分析的气体样品来自钻杆测试取样, 对 5 个气体样品进行了气体组分测定, 对 2 个气体样品进行了碳同位素、稀有气体同位素测定, 落实 CO<sub>2</sub> 的来源。测试工作在中国科学院兰州地质研究所完成。气体成分分析采用的是 MAT271 型质谱计和 GC9160 型气相色谱仪, 温度条件: 室温。碳同位素分析采用的是 DeltaPlusXP 质谱计, 温度条件: 室温。稀有气体同位素使用仪器为英国 Micromass 公司生产的 MM5400 质谱计, 使用的标准样是中国兰州市皋兰山顶的空气( AIRLZ2007) , 实验条件: 高压 9.0 kV, Trap 电流为 200  $\mu$ A( 测 Ar、Kr 时) , 800  $\mu$ A( 测 He、Ne、Xe 时) ; <sup>4</sup>He、<sup>20</sup>Ne、<sup>22</sup>Ne、Ar 用法拉第杯检测, <sup>3</sup>He、<sup>21</sup>Ne、Kr、Xe 用电子倍增器检测; 本底: <sup>4</sup>He = 1.10  $\times 10^{-14}$  mol, <sup>20</sup>Ne = 1.82  $\times 10^{-14}$  mol, <sup>40</sup>Ar = 6.21  $\times 10^{-13}$  mol, <sup>84</sup>Kr = 1.37  $\times 10^{-16}$  mol, <sup>132</sup>Xe = 5.65  $\times 10^{-18}$  mol, 温度条件: 室温。

## 3 结果与讨论

### 3.1 天然气构成及 CO<sub>2</sub> 来源

钻杆测试获得的天然气中 CO<sub>2</sub> 含量( 体积分数, 下同) 为 3.93% ~ 89.06% , N<sub>2</sub> 含量为 0.26% ~ 0.99% , CH<sub>4</sub> 含量为 7.28% ~ 77.94%( 表 1) , CO<sub>2</sub> 的  $\delta^{13}C$  值为 -5.2‰ ~ -6.4‰( PDB) , 处在无机成因 CO<sub>2</sub> 的主要分布范围内( -8‰ ~ +3‰) ( 戴金星等, 1997) ,  $\varphi(^3He)/\varphi(^4He)$  值为 5.490 ~ 6.213 , R/Ra 为 3.9 ~ 4.4 , 具有明显的岩浆-幔源特征( 表 2) , 在 CO<sub>2</sub> 成因投点图( 图 2) 中, 均投在火山幔源成因区间, 表明 CO<sub>2</sub> 主要为火山幔源成因( 图 2) 。

表1 A2及A2E构造油气藏地层流体组成  $\varphi_B/\%$ 

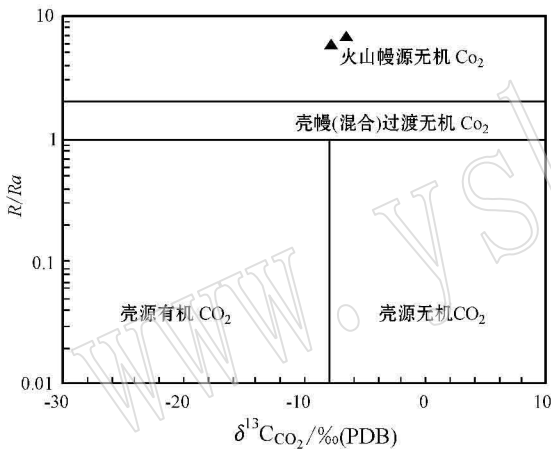
Table 1 Formation fluid components of A2 reservoir and A2E reservoir

井号	$\Lambda 2-2$	$\Lambda 2-3$	$\Lambda 2-3$	$\Lambda 2E-1$	$\Lambda 2E-1$
深度/m	3 333.5	3 246.7	3 290	3 175~ 3 185	3 199~ 3 215
CO <sub>2</sub>	3.93	59.9	89.06	8.31	6.45
N <sub>2</sub>	0.61	0.45	0.26	0.99	0.51
CH <sub>4</sub>	34.93	29.05	7.28	77.94	75.84
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	4.17	2.87	0.72	6.7	8.95
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	2.85	1.58	0.42	3.22	4.62

表2 A2-1井天然气样品同位素组成

Table 2 Composition of nature gas isotopes in Well A2-1

井段/m	$\delta^{13}C_{CO_2}$ /‰	$\varphi(^3He)/$ $\varphi(^4He)$	R/Ra	$\varphi(He)$ /%	$\varphi(^{40}Ar)/$ $\varphi(^{36}Ar)$
3 301~3 308	-5.2	6.213	4.44	0.573	334.7
3 195~3 218	-6.4	5.490	3.92	0.872	299.7

图2 A2构造CO<sub>2</sub>成因判别图(据Zhou等, 2012)Fig. 2 Discriminant diagram of CO<sub>2</sub> origin of A2 structure (after Zhou *et al.*, 2012)

在渤海湾盆地的济阳凹陷和黄骅坳陷发现的11个CO<sub>2</sub>气藏中大多数为纯CO<sub>2</sub>气藏,CO<sub>2</sub>气体地球化学特征表明其CO<sub>2</sub>主要为幔源成因(何家雄等, 2005)。气源断裂体系的发育展布与火山幔源活动脱气是控制这类CO<sub>2</sub>成藏及运聚分布的两大主控因素(王兴谋, 2004; 何家雄等, 2005)。石白坨凸起东段含CO<sub>2</sub>油气藏都是无机的CO<sub>2</sub>与油气共生成藏,这一点与渤海湾盆地的其它CO<sub>2</sub>气藏有着较大区别。油源对比表明,A2构造油源主要来自秦南凹陷沙三段和沙一二段(郝芳等, 2011)<sup>①</sup>。CO<sub>2</sub>包裹体与

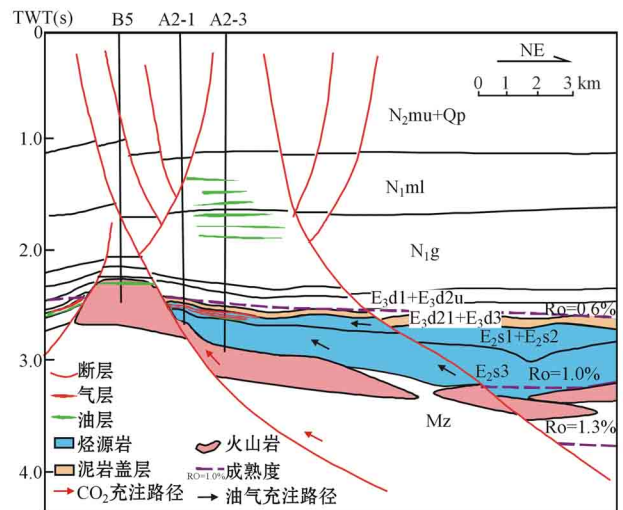
油气包裹体共生,并检测到同时含有CO<sub>2</sub>和烃类的包裹体,因此,可认为CO<sub>2</sub>与油气近同期充注,成藏时间不超过5 Ma(Zhou *et al.*, 2012)。研究区中生界火山岩主要分布在深大断裂附近(图3),控盆的深大断裂是沟通地幔物质的主要通道,也是幔源CO<sub>2</sub>的主要通道,另外中生界火山岩岩浆的二次释气可能也贡献了少部分CO<sub>2</sub>(图3)。

### 3.2 CO<sub>2</sub>流体热效应对伊蒙混层矿物转化的影响

伊蒙混层矿物已经作为较成熟的地质温度计在碎屑岩成岩阶段划分中广泛应用,尤其是泥岩的伊蒙混层中蒙脱石含量也可以作为烃源岩成熟度的重要参考。与泥岩中的伊蒙混层矿物不同,砂岩储层中粘土矿物受埋藏温度和孔隙流体共同控制,而地质流体对储层粘土矿物往往起到决定性的影响。

研究区CO<sub>2</sub>成藏时间较晚,在成藏后继续埋深的深度不大,因此,CO<sub>2</sub>热流体侵位后带来的热效应较明显。包裹体测温数据表明,CO<sub>2</sub>流体侵位后产生了明显的热波动效应,表现在部分与油气包裹体共生的盐水包裹体均一温度超过120℃,甚至超过150℃(表3),而现今的储层温度为110~118℃,可能与油气及CO<sub>2</sub>热流体快速充注导致的热波动效应有关。

在多数情况下,砂岩中的粘土矿物成岩演变程度往往比相邻泥岩深(徐同台等, 2003)。同为渤海

图3 A2构造含CO<sub>2</sub>油气藏成藏模式图Fig. 3 Accumulation model of CO<sub>2</sub>-bearing reservoir in A2 structure

① 郝芳, 邹华耀, 周心怀, 等. 2011. 环渤中地区CO<sub>2</sub>成因分布与油气成藏关系研究. 50~62.

表 3 A2 构造含 CO<sub>2</sub> 油气藏包裹体均一温度

Table 3 Homogenization temperature of inclusions in CO<sub>2</sub>-bearing reservoir from A2 structure

井名	深度/m	产状	成因	类型	均一温度/℃
A2-4	3 293	石英颗粒内裂纹	次生	盐水	92.1 ,99.8 ,140.3 ,109.6 ,86.1 ,104.3 ,78.4 ,86.7 ,82.1 ,103.2
A2-4	3 302.5	石英颗粒内裂纹	次生	盐水	154.6 ,153.2 ,151.6 ,156.6 ,155.7 ,157.4 ,114.7 ,107.4 ,109.1 ,108.4 ,109.7 ,111.4 ,104.6 ,105.2 ,106.3 ,107.1
A2-4	3 312	石英颗粒内裂纹	次生	盐水	97.2 ,102.4 ,144.2 ,107.6 ,117.2 ,116.5 ,115.1 ,109.4 ,111.2 ,112.7 ,113.1 ,113.7 ,110.2 ,106.4
A2-3	3 227	石英颗粒内裂纹	次生	盐水	118.7 ,109.2 ,101.3 ,107.1 ,105.2 ,106.3 ,120.9 ,103.1 ,120.9 ,153.7 ,140.2
A2-3	3 295	石英颗粒内裂纹	次生	盐水	150.4 ,153.8 ,102.3 ,109.9 ,116.7 ,103.3 ,113.6 ,155.7 ,113.2 ,123.9 ,138.7 ,95.4 ,130.1 ,162.4 ,126.7 ,121.6
A2-3	3 309	石英颗粒内裂纹	次生	盐水	148.3 ,127.6 ,101.2 ,130.7 ,96.4 ,125.3 ,125.5 ,134.9 ,132.0 ,125.4 ,123.6 ,119.8 ,107.2 ,100.4 ,111.4 ,126.0
A2-3	3 322	石英颗粒内裂纹	次生	盐水	103.7 ,124.6 ,113.8 ,110.9 ,118.6 ,109.9 ,107.8 ,165.6 ,163.8 ,111.2 ,126.7 ,126.9 ,120.9 ,108.1 ,117.1 ,101.2 ,97.9

湾盆地的济阳坳陷深层砂岩粘土矿物对比表明砂岩中伊蒙混层中蒙皂石含量比泥岩低 0%~15% ,平均只有 7.5%(徐同台等,2003)。研究区含 CO<sub>2</sub> 砂岩粘土中的伊蒙混层中蒙皂石含量只有 5% ,已进入

超点阵有序混层带 ,而同深度的泥岩伊蒙混层矿物仍然稳定地处在有序混层带区间(20%~35%) ,两者相差 15%~30% ,砂岩粘土的较快演化应该是受到了 CO<sub>2</sub> 侵位后热波动效应的影响(表 4)。

表 4 A2-2 井 CO<sub>2</sub> 储集层段砂岩和相近深度泥岩粘土矿物相对含量对比

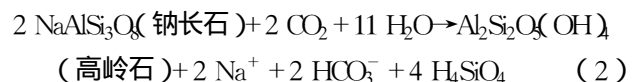
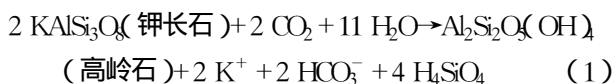
w<sub>B</sub>/%

Table 4 Clay mineral contents of sandstone in CO<sub>2</sub>-bearing reservoir bed and mudstone at similar depth

含 CO <sub>2</sub> 储集层段砂岩岩芯(A2-2 井)				相近深度泥岩岩屑			
深度/m	伊利石	高岭石	伊蒙混层中蒙脱石	深度/m	伊利石	高岭石	伊蒙混层中蒙脱石
3 225.45	7	74	5	3 135	46	6	35
3 228.88	9	72	5	3 170	39	7	35
3 229.87	11	73	5	3 195	36	8	35
3 231.76	7	76	5	3 210	40	7	30
3 233.60	16	68	5	3 315	54	8	25
3 322.08	17	62	5	3 370	45	16	25
3 323.38	13	64	5	3 395	42	14	25
3 325.27	19	70	5	3 415	60	5	20
3 326.83	15	69	5	3 445	56	7	15
3 328.49	20	72	5	3 460	61	6	15
平均值	13.4	70	5	平均值	47.9	8.4	26

### 3.3 CO<sub>2</sub> 对长石的溶蚀作用及自生高岭石的形成

CO<sub>2</sub> 热流体进入储集层后会引引起长石及碳酸盐胶结物的溶蚀。CO<sub>2</sub> 驱油技术在石油开采中已被广泛采用 ,并日趋成熟。室内实验研究表明 ,在 CO<sub>2</sub> 注入砂岩后 ,随着温度提高 ,钠长石、方解石、铁方解石会出现明显溶蚀 ,并随温度增加溶蚀强度增大(曲希玉等,2008)。长石溶蚀伴随高岭石生成的反应式(曲希玉等,2008)如下:



通过扫描电镜及铸体薄片分析 ,发现 A2 构造含 CO<sub>2</sub> 储集层段存在大量长石溶蚀现象(图 4a) ,长石大量溶解往往伴随长石粒内溶蚀孔和铸模孔的出现及自生高岭石的生成。CO<sub>2</sub> 的侵位也会引起碳酸盐胶结物的溶蚀(Holdren Jr and Speyer,1985;Xu Tianfu et al.,2005;Mark Wilkison et al.,2009) ,碳酸盐胶结物的大量溶蚀会释放大量早期胶结的原生孔隙 ,薄片下观察到许多点-游离状接触的颗粒及超大孔

隙(图4b),主要是CO<sub>2</sub>强烈溶蚀长石和碳酸盐胶结物形成的。

A2构造沙河街组一、二段含CO<sub>2</sub>储集层段自生高岭石极发育,平均占粘土矿物的70%(图5、图6),这一数值远高于同深度的泥岩(表3),而同层位相近

成岩阶段的含油砂岩高岭石平均含量只有20%(图6)。高岭石自形程度好,自生特征明显(图5a、5b)。CO<sub>2</sub>侵位后长石等矿物的溶蚀及其向高岭石的转化是自生高岭石大量产生的主要原因之一。

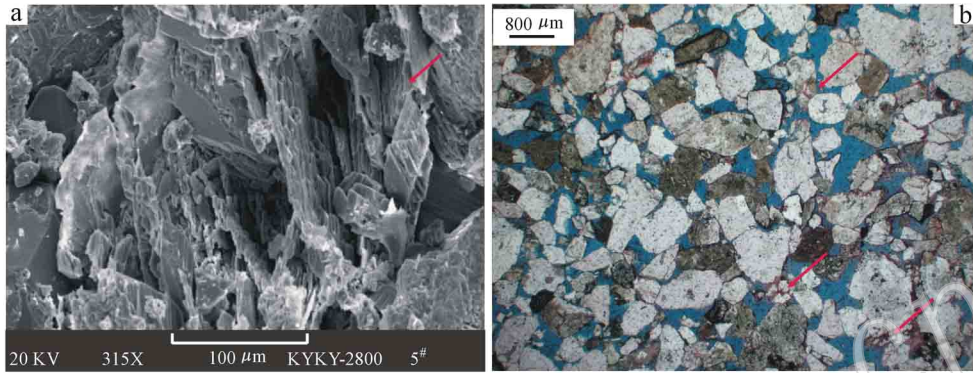


图4 A2-2井含CO<sub>2</sub>储集层段长石及碳酸盐胶结物的溶蚀

Fig. 4 Dissolution of feldspar in CO<sub>2</sub>-bearing reservoir bed interval in well A2-2

a—长石沿解理缝的强烈溶蚀,3326.85 m,扫描电镜;b—碳酸盐胶结物大部分溶蚀,形成貌似原生孔隙为主的面貌,局部残留碳酸盐胶结物(红色,铁氰化钾-茜素红染色),3224.48 m,铸体薄片

a—strong dissolution of feldspar along cleavage seam, at the depth of 3326.85 m, scanning electron microscopy; b—dissolution of most feldspars, at the depth of 3224.48 m, mold thin section

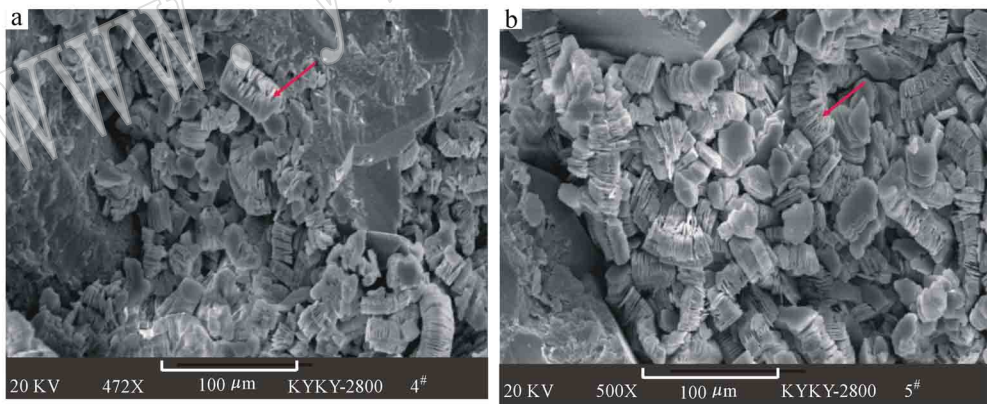


图5 A2-2井储集层段自生高岭石

Fig. 5 Authigenic kaolinite in reservoir bed, well A2-2

a—书页状自生高岭石充填孔,3322.13 m,扫描电镜;b—书页状自生高岭石和自生石英共生,3329.10 m,扫描电镜

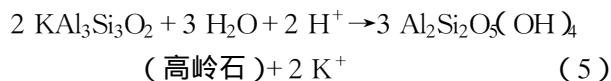
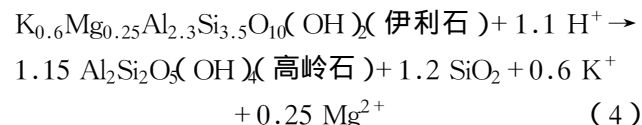
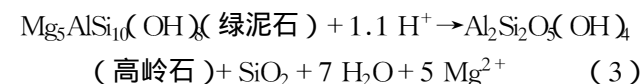
a—page-like authigenic kaolinite filling holes, at the depth of 3322.13 m, scanning electron microscopy; b—page-like authigenic kaolinite and authigenic quartz intergrowth, at the depth of 3329.10 m, scanning electron microscopy

### 3.4 CO<sub>2</sub>侵位后形成的偏酸性流体环境对粘土矿物转化的影响

实验表明,注入CO<sub>2</sub>后地层水pH值显著降低,地层水中金属离子显著增加(Bowker *et al.*, 1991; Kharaka *et al.*, 2006)。幔源CO<sub>2</sub>进入储集层后,在

CO<sub>2</sub>量充足的条件下,成岩流体酸碱度将受控于CO<sub>2</sub>而呈弱酸性。偏酸性条件对粘土的影响主要体现在以下两方面:一方面,有利于大量自生高岭石的沉淀,表现为长石溶出物向高岭石转化(反应式1、2),有利于其它粘土矿物向高岭石转化(徐同台等,

2003) ,反应式如下 :



另一方面,强烈抑制伊利石的生成,偏酸性环境伊利石会停止生长或向其他矿物转化。含 CO<sub>2</sub> 储集层段的砂岩伊利石相对含量较低,平均仅为 13%(表 2),这与中成岩 A II ~ B 期储集层粘土矿物特点有很大差异,也比渤海海域沙一二段含油储集层伊利石含量的平均值低 50% 以上(图 6),其主要原因在于偏酸性的流体环境抑制伊利石的生成。另外,在酸性流体条件下伊利石可以向高岭石转化(反应式 4),这可能也是造成伊利石含量下降、高岭石增加的原因之一。

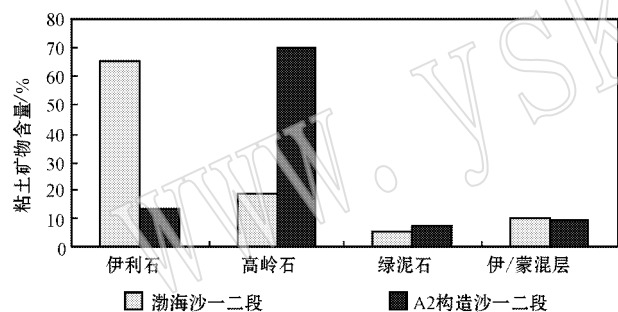


图 6 渤海海域沙一二段(180 个样品)含油储集层与 A2 构造(16 个样品)CO<sub>2</sub> 储集层粘土矿物对比

Fig. 6 Clay minerals of CO<sub>2</sub>-bearing reservoir in A2 structure versus those of oil-bearing sandstone in Shahejie 1~2 member of Bohai sea waters

### 3.5 CO<sub>2</sub> 对储集层物性的整体影响

长石溶蚀和长期偏酸性环境促进高岭石的发育,抑制伊利石生长。两类粘土矿物对储集层物性的影响作用不同,伊利石发育会堵塞孔隙喉道,使孔隙复杂化,而高岭石主要以孔隙充填形态存在,对孔隙喉道影响相对较小(Manmath and Larry, 1995)。国内大量研究也表明,高岭石含量与渗透率往往是呈正相关,与伊利石含量呈负相关(赵杏媛等, 2001, 2005; 赵杏媛, 2009)。其原因在于高岭石往往是酸性环境长石溶蚀作用的产物,而长石溶蚀也伴随物性的改善;另外,酸性环境下蒙皂石、伊利石等粘土

矿物会向高岭石转化,而高岭石的比表面积远小于蒙皂石和伊利石(赵杏媛等, 2001),随着这一转化的进行,粘土对渗透率的破坏作用会降低。因此,含油气储层中自生高岭石的大量发育往往是和优质储层段相对应的。A2 构造含 CO<sub>2</sub> 储集层段孔隙度和渗透率均较高,尤其高渗特征明显,最高渗透率超过 6 000 × 10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>(图 7),这在渤海湾盆地埋深 3 000 m 以下的碎屑岩储集层中从未见到过,测试油气产能均超过 200 m<sup>3</sup>/d。除了 CO<sub>2</sub> 对碳酸盐胶结物的溶蚀作用改善储层物性之外,CO<sub>2</sub> 侵位后对粘土的影响也是渗透率保持的重要原因。

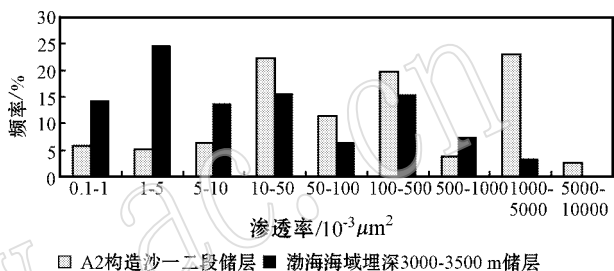


图 7 A2 构造含 CO<sub>2</sub> 储集层(埋深 2 000~3 400 m)与渤海相近深度储集层渗透率频率分布对比

Fig. 7 Sandstone quality of CO<sub>2</sub>-bearing reservoir bed versus sandstone quality below 3 000 m in Bozhong depression

渤中坳陷已经发现的含 CO<sub>2</sub> 气藏多是与油气相伴生的,因此,CO<sub>2</sub> 对油气储层的影响具有特殊意义,在渤海海域深层低孔渗已成为制约深层勘探的首要因素,CO<sub>2</sub> 侵位后的溶蚀,抑制伊利石,促进高岭石等作用往往可以极大改善储层质量,幔源 CO<sub>2</sub> 流体活跃带往往会形成高产优质储层带。

## 4 结论

(1) 研究区 A2 构造沙河街组一、二段 CO<sub>2</sub> 气体主要为火山幔源无机气,应主要来自深部地幔岩浆体的脱气作用,控盆的深大断裂是幔源 CO<sub>2</sub> 的主要运移通道。

(2) CO<sub>2</sub> 热流体侵位形成的弱酸性环境加剧了长石的溶蚀,有利于高岭石的发育,抑制伊利石发育,储集层自生高岭石含量高,伊利石含量低;CO<sub>2</sub> 热流体侵位后的热波动效应加快了储集层中伊蒙混层粘土的演化。

(3) CO<sub>2</sub> 热流体侵位后形成的偏酸性环境抑制

伊利石的生成,促进自生高岭石的发育有利于储集层渗透率的保持,这一因素是含 CO<sub>2</sub> 储集层保持高渗的重要原因之一。

## References

Bowker K A and Shuler P J. 1991. Carbon dioxide injection and resultant alteration of the Weber sandstone, Rangely field, Colorado [ J ]. AAPG, 75(9): 1489~1499.

Dai Jinxing, Fu Chengde, Guan Defan, *et al.* 1997. New Development of Nature Gas Geology[ M ]. Beijing: Petroleum Industry Press, 203~206( in Chinese ).

He Jiaxiong, Xia Bin, Liu Baoming, *et al.* 2005. Accumulated mechanisms for different genetic types of non-biological CO<sub>2</sub> and controlling factors in north marginal basins, South China Sea[ J ]. Petroleum Exploration and Development, 32(4): 663~673( in Chinese ).

Holdren Jr G R and Speyer P M. 1985. pH dependent changes in rates and stoichiometry of dissolution of an alkali feldspar at room temperature[ J ]. Am. J. Sci., 285: 954~1026.

Kharaka Y K, Cole D R, Hovorka S D, *et al.* 2006. Gas-water-rock interactions in Frio Formation following CO<sub>2</sub> injection: implications for the storage of greenhouse gases in sedimentary basins[ J ]. Geology, 34: 577~580.

Liu Li, Zhu Defeng, Qu Xiyu, *et al.* 2009. Impact of mantle genetic CO<sub>2</sub> influx on the reservoir quality of lower cretaceous stone from Wuexun depression, Hailaer basin[ J ]. Acta Petrologica Sinica, 25(10): 2311~2319( in Chinese ).

Mark W, Haszeldine R S, Fillicif A E, *et al.* 2009. CO<sub>2</sub>-mineral reaction in a natural analogue for CO<sub>2</sub> storage-implications for modeling [ J ]. Journal of Sedimentary Research, 79: 486~494.

Manmath N P and Larry W L. 1995. A physical model of cementation and its effects on single-phase permeability[ J ]. AAPG Bulletin, 79(3): 431~443.

Qu Xiyu, Liu Li, Ma Rui, *et al.* 2008. Experiment on debris-arkosic sandstone reformation by CO<sub>2</sub> fluid[ J ]. Journal of Jilin University ( Earth Science Edition ), 38(6): 959~964( in Chinese ).

Wang Xingmou. 2004. CO<sub>2</sub> Gas Reservoir Exploration Basis in Jiyang Depression[ M ]. Beijing: The Petroleum University Press, 31~90( in Chinese ).

Xu Tianfu, John A A and Karsten Pruess. 2005. Mineral sequestration of carbon dioxide in a sandstone-shale system[ J ]. Chemical Geology, 217: 295~318.

Xu Tongtai, Wang Xingxin, Zhang Youyu, *et al.* 2003. Clay Minerals in Oil-gas Bearing Basins in China[ M ]. Beijing: Petroleum Industry Press, 63~84( in Chinese ).

Zhai Guangming, Gong Zaisheng, Wang Shanshu, *et al.* 2002. Petroleum Geology of China[ M ]. Petroleum Industry Press, 90~105( in Chinese ).

Zhao Xingyuan. 2009. The impact of clay minerals on oil-gas reservoir [ J ]. Xinjiang Petroleum Geology, 30(4): 531~536( in Chinese ).

Zhao Xingyuan, Luo Juncheng, Yang Fan, *et al.* 2005. Application of clay mineral study results to hydrocarbon prospecting in Tarim Basin[ J ]. Xinjiang Petroleum Geology, 26(5): 570~576( in Chinese ).

Zhao Xingyuan, Yang Fan, Luo Juncheng, *et al.* 2001. Clay Minerals in Tarim Basin[ M ]. Beijing: China University of Geosciences Press, 250~260( in Chinese ).

Zhou Xinhui, Wang Qingbin, Li Jianping, *et al.* 2012. Impact of late-accumulated mantle-derived CO<sub>2</sub> on quality of Paleogene clastic reservoir at actic area, Qin Nan Sag [ J ]. Energy Exploration & Exploitation, 30(2): 295~310.

## 附中文参考文献

戴金星,傅诚德,关德范. 1997. 天然气地质研究新进展[ M ]. 北京: 石油工业出版社, 203~206.

何家雄,夏斌,刘宝明,等. 2005. 中国东部及近海陆架盆地 CO<sub>2</sub> 成因及运聚规律与控制因素研究[ J ]. 石油勘探与开发, 32(4): 663~673.

刘立,朱德丰,曲希玉,等. 2009. 海拉尔盆地乌尔逊凹陷幔源 CO<sub>2</sub> 充注对下白垩统砂岩储集层质量的影响[ J ]. 岩石学报, 25(10): 2311~2319.

曲希玉,刘立,马瑞,等. 2008. CO<sub>2</sub> 流体对岩屑长石砂岩改造作用的实验[ J ]. 吉林大学学报(地球科学版), 38(6): 959~964.

王兴谋. 2004. 济阳拗陷 CO<sub>2</sub> 气藏勘探基础[ M ]. 北京: 石油大学出版社, 31~90.

徐同台,王行信,张有瑜,等. 2003. 中国含油气盆地粘土矿物[ M ]. 北京: 石油工业出版社, 63~68, 235.

翟光明,龚再升,王善书,等. 2002. 中国石油地质志(卷十六)[ M ]. 北京: 石油工业出版社, 90~105.

赵杏媛. 2009. 粘土矿物与油气[ J ]. 新疆石油地质, 30(4): 531~536.

赵杏媛,罗俊成,杨帆. 2005. 粘土矿物研究成果在塔里木盆地油气勘探中的应用[ J ]. 新疆石油地质, 26(5): 570~576.

赵杏媛,杨威,罗俊成,等. 2001. 塔里木盆地粘土矿物[ M ]. 北京: 中国地质大学出版社, 250~260.