

鄂尔多斯盆地伊金霍洛旗附近二叠系石千峰组 岩石学、地球化学特征及其固碳能力分析

刘娜娜¹, 刘立¹, 明晓冉¹, 王福刚², 宋土顺¹, 王力娟¹

(1. 吉林大学地球科学学院, 吉林 长春 130061; 2. 吉林大学环境工程学院, 吉林 长春 130061)

摘要: 鄂尔多斯盆地是我国 CO₂ 地下埋藏的潜在目标区, 位于伊金霍洛旗附近的中神监 X 井与 CO₂ 地下注入井中神注 1 井相邻, 两者钻遇地层系统和岩石组合一致。为对示范区储层的固碳潜力和泥岩改造状况做出预测, 为 CO₂ 地质储存的数值模拟研究提供基础地质信息和相关数据, 通过偏光显微镜、扫描电镜、X 射线衍射、X 射线荧光等多种技术手段, 开展了中神监 X 井石千峰组的岩石学和地球化学特征研究。结果表明石千峰组的砂岩岩石类型主要为长石岩屑砂岩和岩屑长石砂岩, 泥岩主要由石英、粘土矿物和长石组成, 其中, 粘土矿物主要为伊利石, 其次为蒙皂石、高岭石和绿泥石。预测在 CO₂ 注入后的流体-砂岩长期相互作用过程中, 石千峰组砂岩可以通过形成片钠铝石、方解石、铁白云石和菱铁矿等固碳矿物, 形成对 CO₂ 泄露而言的矿物圈闭, 进而实现 CO₂ 的长期和安全封存, 红色泥岩夹层将发生金属离子活化, 导致泥岩褪色。

关键词: 内蒙古伊金霍洛旗, 石千峰组, 矿物圈闭, CO₂ 地质储存

中图分类号: P588.21⁺2.3; P595

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2014)02-0255-08

Petrologic and geochemical characteristics and carbon sequestration capability of the Permian Shiqianfeng Formation around Ejin Horo Banner of Ordos Basin

LIU Na-na¹, LIU Li¹, MING Xiao-ran¹, WANG Fu-gang², SONG Tu-shun¹ and
WANG Li-juan¹

(1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China; 2. College of Environment and Resources, Jilin University, Changchun 130061, China)

Abstract: Ordos basin is the potential target zone of CO₂ underground storage in China. Well Zhongshenjian X is located near the Ejin Horo Banner, neighboring the underground CO₂ injection well “Zhongshenzhu One”, and the two wells have the same formation system and rock composition. To predict the potential of carbon sequestration in the reservoir and the mudstone transformation conditions in the demonstration area and provide basic geological information and relevant data for numerical simulation of the CO₂ geological storage, the authors investigated petrologic and geochemical characteristics of Shiqianfeng Formation in well Zhongshenjian by means of polarizing microscope, SEM, X-ray diffraction and X ray fluorescence, and the results suggest that the sandstone of Shiqianfeng Formation is mainly feldspathic lithic sandstone and lithic feldspar sandstone, and the mudstone is mainly composed of quartz, clay minerals and feldspar, in which the clay minerals are mainly smectite and illite, followed by kaolinite and chlorite. It is inferred that sandstone in Shiqianfeng Formation could form

收稿日期: 2013-01-23; 修订日期: 2013-09-04

基金项目: 中国地质调查局项目(1212011120048)

作者简介: 刘娜娜(1989-), 女, 在读硕士研究生, 主要从事储存沉积学方面的研究, E-mail: liu_nana1989@126.com; 通讯作者:

刘立(1955-), 男, 教授, 主要从事储层、层序地层及沉积方面的研究, E-mail: liuli0892@vip.sina.com

the mineral trap relative to the CO₂ leaks by forming carbon sequestration minerals such as dawsonite, calcite, ankerite and siderite, and then the long-term and safe storage of CO₂ could be realized. In addition, metals were mobilized, resulting in the bleach of the red mudstone interlayer.

Key words: Ejin Horo Banner of Inner Mongolia; Shiqianfeng Formation; mineral trap; CO₂ geological storage

将工业排放的 CO₂ 储存于地下咸水层、枯竭的油气藏和不可采煤层是缓解温室效应引起的气候变化的重要措施之一 (Metz *et al.*, 2005), 这一措施被称为 CO₂ 地质储存。Sleipner 是第一个商业规模的 CO₂ 注入工程, 截至 2008 年中期, 已有 1 000 万吨 CO₂ 被注入到海平面以下 1 000 m 地层的咸水层中 (Shukla, 2010)。而后, 加拿大的 Weyburn 工程 (Emberley *et al.*, 2004)、阿尔及利亚的 Salah 工程 (Martin and Philip, 2009) 和澳大利亚 Otway 盆地盐卤水层示范工程 (Peter, 2009) 都先后展开。神华集团于 2010 年启动了国内第一个以 CO₂ 减排为目的的 CO₂ 捕获与地质储存工程 (张超宇等, 2010), 并完成了 CO₂ 地下注入井中神注 1 井的钻注。鄂尔多斯盆地是我国 CO₂ 地下埋藏的潜在目标区, 位于伊金霍洛旗附近的中神监 X 井与中神注 1 井相邻, 两者钻遇地层系统和岩石组合一致。中神监 X 井的井深为 2 500 m 左右 (万玉玉, 2012), 钻遇地层自下而上为奥陶系马家沟组, 石炭系本溪组、太原组, 二叠系山西组、下石盒子组、石千峰组, 三叠系刘家沟组、和尚沟组、纸坊组、延长组, 侏罗系延安组、直罗组、安定组和白垩系东胜-罗汉洞组。CO₂ 地质埋存层位包括石炭系本溪组、太原组, 二叠系山西组、下石盒子组、石千峰组和三叠系刘家沟组。石千峰组作为 CO₂ 存储示范工程的地下埋存储层, 其沉积体系、岩相古地理、层序地层学及成岩作用研究已经比较深入 (张翔等, 2009; 张满郎等, 2009; 兰朝利等, 2011), 但有关岩石学和地球化学方面的研究相对薄弱, 开展其岩石学特征和地球化学特征研究, 对示范区储层的固碳 (CO₂ 的矿物捕获) 潜力和泥岩改造状况做出预测, 将为 CO₂ 地质储存的数值模拟研究提供基础地质信息和相关数据。

1 取样与研究方法

研究的样品系钻井岩屑, 采自内蒙古伊金霍洛旗附近中神监 X 井钻遇的二叠系石千峰组 (埋深 1 695~1 987 m)。石千峰组下部为紫红色泥岩与棕

红色细砂岩互层, 中部为紫红-绿灰色泥岩与灰色细砂岩呈不等互层, 上部为紫红色泥岩与棕红色细砂岩互层 (图 1)。采集的钻井岩屑样品共 54 件, 其中

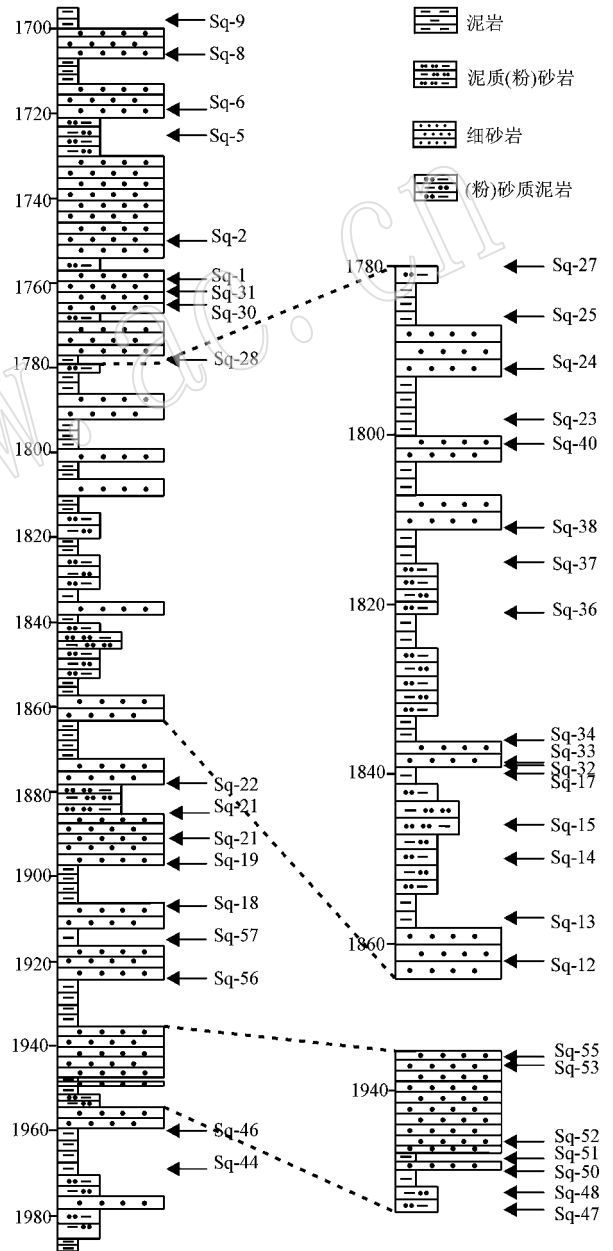


图 1 中神监 X 井二叠系石千峰组简化的岩性柱状图与取样位置

Fig. 1 Schematic stratigraphic columnar section of well Zhongshenjian X in Permian Shiqianfeng Formation and sampling locations

砂岩样品 13 件,泥岩样品 41 件。在对钻井岩屑样品进行清洗、晾晒、去除上覆岩层掉落和去除杂质的基础上,加工成粉末和块状待测样品。在研究中先后进行了薄片鉴定、全岩化学分析、矿物组成和含量分析、粘土矿物相对含量和矿物形貌的分析和观察。对粉末样品进行了全岩化学分析、矿物组成和含量及粘土矿物相对含量分析。8 件砂岩和 3 件泥岩全岩化学成分分析是在吉林大学测试科学实验中心采用 PW1404/10 型 X 射线荧光光谱分析仪分析的,X 射线管功率 3 kW,最高工作电压 100 kV,最大工作电流 75 mA。28 件泥岩的全岩矿物组成和 $<2 \mu\text{m}$ 的粘土矿物是在吉林大学利用 Dmax-2500 型 X 射线衍射分析仪完成的,加速电压 40 kV,电流 40 mA,扫描步长 1.02° ,时间步长 2 s, 2θ 为 $0^\circ \sim 50^\circ$ 。对块状样品进行了薄片鉴定和扫描电镜观察。制作注胶模

型,将小块的岩屑样品进行注胶处理,切制薄片 13 块,其中砂岩样品 10 个,泥岩样品 3 个,通过日本产 OLYMPUS 偏光显微镜对薄片中的矿物进行鉴定和统计。3 件砂岩全岩化学成分和矿物形貌是在吉林大学古生物中心实验室,利用 JSM-6700F 型扫描电镜和配置的 IN-SIGHT 型能谱仪观察和分析的,加速电压 10 kV,加速电流 5.74 mA,束斑 $<1 \mu\text{m}$ 。

2 岩石学特征

2.1 砂岩岩石学特征

薄片鉴定和统计表明,砂岩的骨架碎屑成分为石英(50%~65%)、长石(17%~29%)和岩屑(10%~28%) (表 1)。石英以单晶石英为主,多晶石英少量;长石以碱性长石为主,包括正长石、微斜长石和

表 1 砂岩骨架碎屑成分统计表

Table 1 Statistics of framework clastic composition of sandstones

$\varphi_B/\%$

薄片编号	深度/m	镜下鉴定岩石类型	石英 ^a	长石 ^a	岩屑 ^a	石英 ^b	长石 ^b	岩屑 ^b	石英/长石+岩屑
Sq-8	1 706	中-细粒长石岩屑砂岩	45	20	25	50	22	28	1
Sq-6	1 719	中-细粒长石岩屑砂岩	50	15	25	55	17	28	1.22
Sq-31	1 759	中-细粒岩屑长石砂岩	55	20	10	65	23	12	1.86
Sq-30	1 765	细-中粒岩屑长石砂岩	50	25	10	59	29	12	1.44
Sq-15	1 846	细-微粒岩屑长石砂岩	45	20	7	62	28	10	1.63
Sq-12	1 861	粗-中粒长石岩屑砂岩	45	15	20	56	19	25	1.27
Sq-22	1 878	中-细粒长石岩屑砂岩	50	15	20	59	18	23	1.44
Sq-21	1 885	细-微粒岩屑长石砂岩	50	15	5	60	27	13	1.5
Sq-20	1 891	中-细粒岩屑长石砂岩	55	25	10	61	28	11	1.56
Sq-19	1 897	中-细粒长石岩屑砂岩	50	15	20	59	18	23	1.44

石英^a—石英占砂岩总体积的百分数;石英^b—石英占骨架碎屑组分的百分数;长石^a—长石占砂岩总体积的百分数;长石^b—长石占骨架碎屑组分的百分数;岩屑^a—岩屑占砂岩总体积的百分数;岩屑^b—岩屑占骨架碎屑组分的百分数。

条纹长石等,斜长石少量,岩屑主要为沉积岩岩屑和变质岩岩屑。根据砂岩岩石类型分类,所研究的砂岩为岩屑长石砂岩(图 2a)和长石岩屑砂岩(图 3)。粒度多为中-细粒,少量为粗粒,分选差,呈棱角-次圆状,成分成熟度较低(1~1.86) (表 1)。砂岩中的胶结物主要为方解石(图 2b)。

2.2 泥岩岩石学特征

薄片鉴定(表 2)表明,泥岩以粘土矿物(粒度 $<0.004 \text{ mm}$)为主(80%~85%),其次为粉砂级碎屑(粒度介于 $0.004 \sim 0.05 \text{ mm}$, 15%~20%)。粉砂级碎屑主要为石英,其次为长石。按照泥岩分类(曾允孚等, 1986),所研究的泥岩为含粉砂泥岩。

泥岩样品全岩 X 射线衍射分析(表 3)表明,泥岩主要由粘土矿物组成(42%~74%),其次为石英

(11%~32%)、碱性长石(4%~12%)和斜长石(3%~15%)。碳酸盐矿物(2%~11%)少量。粘土矿物以伊利石为主(27%~45%),其次为蒙皂石(9%~25%)、高岭石(2%~6%)和绿泥石(3%~7%)。按照泥岩分类(曾允孚等, 1986),所研究的泥岩为钙质泥岩。综合薄片鉴定和常量元素含量结果,所研究的泥岩为含粉砂钙质泥岩。

3 地球化学特征

3.1 砂岩地球化学特征

根据全岩 X 射线荧光分析和化学分析得出常量元素含量(表 4),砂岩样品的主要氧化物为 SiO_2 (60.02%~68.98%),其次为 Al_2O_3 (10.74%~

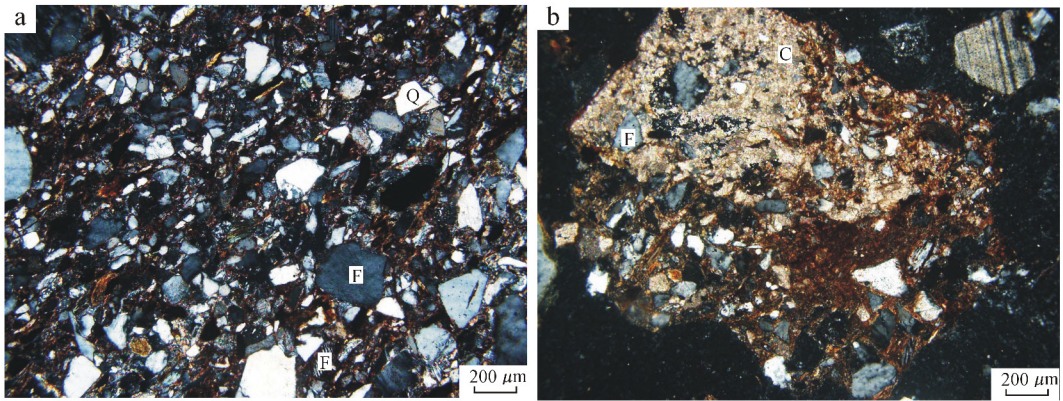


图 2 石千峰组砂岩显微照片(正交偏光)

Fig. 2 Microphotographs of sandstone from Shiqianfeng Formation (crossed nicols)

a—细-中粒钙质岩屑长石砂岩; b—中-细粒钙质长石岩屑砂岩中的方解石胶结; F—长石; Q—碎屑石英; C—方解石胶结

a—fine-middle grained calcareous lithic feldspathic sandstones; b—middle-fine grained calcareous feldspathic lithic sandstones;

F—feldspar; Q—quartz; C—calcite cement

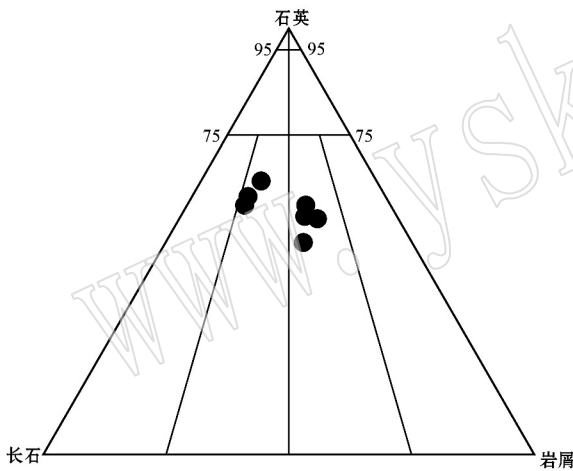


图 3 砂岩骨架碎屑成分三角图

Fig. 3 Triangular diagram of framework clastic composition of sandstones

表 2 泥岩样品薄片鉴定结果 $\varphi_B/\%$

Table 2 Thin section identification of mudstone samples

薄片编号	深度 /m	镜下鉴定 岩石类型	粘土矿物	石英	长石
Sq-9	1 698	含粉砂泥岩	80	10	5
Sq-23	1 796	含粉砂泥岩	80	10	5
Sq-44	1 969	含粉砂泥岩	85	15	5

13.55%)、 Fe_2O_3 (3.82% ~ 5.95%) 和 CaO (2.77% ~ 5.79%), FeO 、 MgO 、 K_2O 和 Na_2O 少量 (0.67% ~ 2.35%)。

3.2 泥岩地球化学特征

泥岩中的氧化物含量的数量级与砂岩相似, 表现为以 SiO_2 (69.44% ~ 71.62%) 为主, 其次为 Al_2O_3 (10.75% ~ 11.87%)、 Fe_2O_3 (3.67% ~ 4.51%)、 CaO (2.66% ~ 3.56%), FeO 、 MgO 、 K_2O 和 Na_2O 少量 (1.09% ~ 2.08%) (表 5)。

4 讨论

中神监 X 井位于中神注 1 井附近, 前者钻遇的地层系统和岩性与后者应该是高度相似的。此外, 尽管测试分析采用的是钻井岩屑样品, 但是, 严格的样品挑选及与区域相关层位岩性的比对, 从而保证了研究样品的可靠性。因此, 根据中神监 X 井钻遇的二叠系石千峰组钻井岩屑进行的岩石学与地球化学研究, 预测中神注 1 井相应地层单元的含 CO_2 流体-岩石的长期相互作用是可行的。

富含长石的砂岩有利于形成 CO_2 矿物圈闭。 CO_2 的圈闭机制包括构造和地层圈闭、水动力圈闭、残余圈闭、溶解或者离子圈闭和矿物圈闭 (Bachu, 2008)。在多种 CO_2 地质处置方法中 (Bachu *et al.*, 1994; Gentzis, 2000; Holloway, 2001; Shukla, 2010), 目前认为最稳定有效的方法是矿物圈闭 (mineral trapping), 即将 CO_2 气体注入沉积盆地深部咸水层中, 使其在地质流体环境下与岩石经历较长时间 (几千年甚至百万年) 的相互作用并最终与碳酸

表 3 泥岩样品全岩 X 射线衍射分析结果

 $w_B/\%$

Table 3 Whole rock X-ray diffraction analyses of mudstone samples

样品编号	深度/m	石英	碱性长石	斜长石	方解石	伊利石	蒙皂石	高岭石	绿泥石
Sq-5	1 725	32	4	5	7	28	16	3	5
Sq-2	1 750	13	11	7	2	39	17	5	6
Sq-1	1 758	11	22	5	3	34	15	6	4
Sq-28	1 778	14	4	4	14	35	18	5	6
Sq-27	1 780	15	4	3	4	43	19	6	6
Sq-25	1 786	20	5	3	2	40	20	5	5
Sq-24	1 792	13	4	5	4	45	17	6	6
Sq-40	1 801	11	16	13	5	34	13	4	4
Sq-38	1 811	14	8	5	5	43	14	6	5
Sq-37	1 815	19	6	4	5	36	19	6	5
Sq-36	1 821	14	12	5	11	32	16	5	5
Sq-34	1 833	15	13	8	3	41	11	5	4
Sq-33	1 836	13	14	6	5	38	15	5	4
Sq-32	1 839	19	25	5	3	31	11	2	4
Sq-17	1 840	14	7	11	3	42	12	5	6
Sq-14	1 850	19	17	5	6	34	13	3	3
Sq-13	1 857	15	5	7	4	41	18	5	5
Sq-18	1 907	19	5	4	3	43	15	5	6
Sq-57	1 915	16	18	10	3	28	14	4	7
Sq-56	1 924	23	28	5	2	27	9	3	3
Sq-55	1 928	15	27	6	2	31	12	3	4
Sq-53	1 937	21	5	4	3	39	19	5	4
Sq-52	1 946	16	7	15	4	36	15	3	4
Sq-51	1 948	11	8	4	4	38	25	4	6
Sq-50	1 949	14	13	5	4	37	16	5	6
Sq-48	1 952	18	6	4	3	44	14	5	6
Sq-47	1 954	22	23	6	4	29	10	3	3
Sq-46	1 956	14	20	3	6	33	15	4	5

表 4 砂岩样品常量元素含量

 $w_B/\%$

Table 4 Major element content of sandstone samples

样品编号	深度/m	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	合计
Sq-8	1 706	66.50	0.56	11.92	5.95	1.09	0.12	1.91	3.05	1.52	2.76	0.11	3.82	99.31
Sq-6	1 719	68.98	0.57	11.84	4.58	1.14	0.10	2.01	2.77	1.62	2.87	0.11	3.38	99.96
Sq-30	1 765	65.64	0.55	12.35	4.40	1.09	0.04	2.31	4.02	1.54	2.89	0.11	4.71	99.64
Sq-15	1 846	60.22	0.57	13.21	4.90	0.67	0.06	2.74	5.79	1.57	3.00	0.11	6.63	99.47
Sq-12	1 861	65.02	0.57	13.55	4.65	0.88	0.10	2.41	3.58	1.48	2.93	0.13	5.25	100.56
Sq-22	1 878	68.46	0.53	11.74	3.95	0.83	0.12	1.87	3.30	1.63	2.86	0.13	3.88	99.31
Sq-21	1 885	67.56	0.52	12.66	3.82	0.78	0.06	2.10	3.67	1.75	2.92	0.11	4.34	100.28
Sq-19	1 897	65.72	0.57	12.88	4.15	1.24	0.08	2.35	3.45	1.65	2.93	0.11	4.36	99.49

表 5 泥岩样品常量元素含量

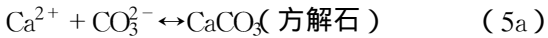
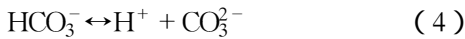
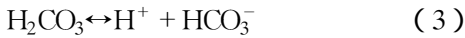
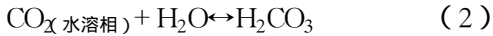
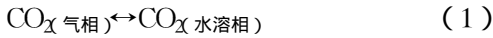
 $w_B/\%$

Table 5 Major element content of mudstone samples

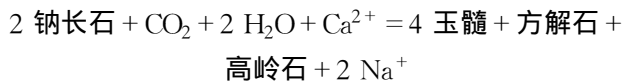
样品编号	深度/m	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	合计
Sq-9	1 698	69.44	0.60	11.64	4.37	1.50	0.08	1.80	2.66	1.60	2.83	0.13	3.30	99.96
Sq-23	1 796	67.94	0.57	11.87	4.51	1.29	0.08	2.08	3.56	1.53	2.80	0.13	3.90	100.27
Sq-44	1 969	71.62	0.57	10.75	3.67	1.09	0.10	1.62	2.92	1.77	2.84	0.11	2.91	99.97

盐形式“固结”在岩石中(Gunter *et al.*, 1997; Bachu *et al.*, 1994; Johnson *et al.*, 2001, 2002; Baines and Worden, 2004)。

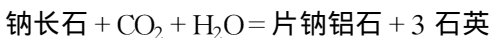
在理论上,当 CO₂ 注入到地下咸水层(砂岩)以后,部分 CO₂ 将溶于水形成水溶 CO₂ 气(反应式 1),进而形成碳酸(反应式 2),碳酸再解离成重碳酸盐(反应式 3),尔后解离出碳酸根离子和氢离子(反应式 4),最后,碳酸根与 Ca²⁺、Mg²⁺ 和 Fe²⁺ 结合形成方解石、白云石和菱铁矿(反应式 5)(Ortoleva *et al.*, 1998),碳酸根与 Al³⁺、Na⁺ 结合形成片钠铝石(反应式 5d)。



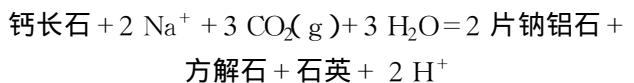
所形成的方解石、白云石、菱铁矿和片钠铝石等碳酸盐矿物即为固碳矿物,其固碳(C)量由高到低顺序为:菱铁矿(147 kg/cm³)>方解石(119 kg/cm³)>铁白云石(113 kg/cm³)>片钠铝石(75 kg/cm³)>(kg/cm³)(Oelkers *et al.*, 2009)。在地下盐水层(砂岩)中,形成碳酸盐矿物所需的 Na⁺、Al³⁺、Ca²⁺、Mg²⁺ 和 Fe²⁺ 离子除部分来自地层水外,绝大部分来自砂岩中的铝硅酸盐矿物的溶蚀、溶解作用。这些铝硅酸盐矿物主要为斜长石,其中钙长石端员的分子式为 CaAl₂Si₂O₈,钠长石端员的分子式为 (NaAlSi₃O₈),以及钾长石(KAlSi₃O₈)等。形成碳酸盐矿物的主要成岩反应如下:



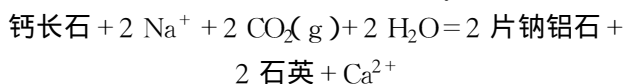
(Gaus *et al.*, 2005)



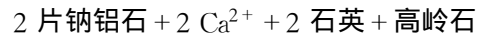
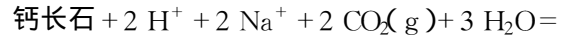
(Ryzhenko, 2006; Worden, 2006; Gause, 2010)



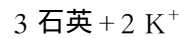
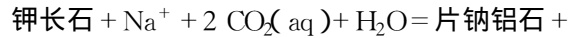
(Ryzhenko, 2006)



(Ryzhenko, 2006)



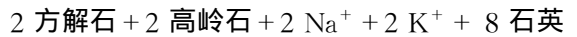
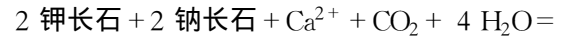
(Ryzhenko, 2006)



(Johnson *et al.*, 2001)



(Gunter *et al.*, 1997)



(Ketzner *et al.*, 2009)

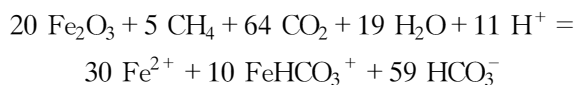
在以上的反应矿物中,长石(包括斜长石和钾长石)是砂岩的主要骨架成分之一。砂岩的另外两个骨架碎屑成分分别为石英和岩屑。在以上的反应式中,没有任何一种固碳矿物的形成与石英有关。此外,尽管砂岩中的岩屑类型比较复杂,但是,绝大部分岩屑中都或多或少地含有一定量的长石。因此,对于 CO₂ 的矿物圈闭而言,富含长石和富含岩屑的砂岩最为有利。

目前研究表明,富含长石的砂岩、富含火山岩岩屑的砂岩和火山碎屑岩对 CO₂ 具有较大的矿物圈闭能力。砂岩分布广泛,有足够的孔隙利于流体注入及碳酸盐矿物的生成,同时金属离子含量较高且易于析出,在形成次生孔隙的同时,能为 CO₂ 的矿物圈闭提供金属离子,是目前国内外关于 CO₂ 矿物圈闭研究的重点。海拉尔盆地乌尔逊凹陷内已发现的 4 个无机 CO₂ 气藏及其附近的下白垩统扎赉诺尔群南屯组砂岩和松辽盆地长岭凹陷内孤店 CO₂ 气田及其附近的下白垩统泉头组四段发育的含片钠铝石砂岩为长石砂岩和岩屑长石砂岩(高玉巧等, 2008),东海盆地丽水凹陷 CO₂ 气藏的含片钠铝石砂岩为岩屑砂岩。含片钠铝石砂岩中与 CO₂ 充注有关的碳酸盐矿物的固碳量计算和数值模拟(刘娜, 2011)表明,富含长石的砂岩对 CO₂ 具有较大的矿物捕获潜力,成分成熟度低的砂岩对 CO₂ 的矿物捕获潜力相对较大。

根据钻井岩屑的鉴定,鄂尔多斯盆地伊金霍洛旗乌兰木伦镇附近中神监 X 井石干峰组储层岩石类型主要为岩屑长石砂岩和长石岩屑砂岩,长石含量较高(15% ~ 25%),砂岩成分成熟度较低(1 ~ 1.83),这与海拉尔盆地乌尔逊凹陷 CO₂ 气藏、松辽盆地长岭凹陷内孤店 CO₂ 气田储层和东海盆地丽水凹陷 CO₂ 气藏的岩石类型基本一致,因此理论上具

有较强的 CO₂ 矿物捕获能力。东海盆地丽水凹陷 CO₂ 气藏含片钠铝石砂岩中 CO₂ 充注形成的碳酸盐矿物为片钠铝石(含量平均为 3.61%)和方解石(含量平均为 2.0%),固碳量为 41.84 kg/m³。松辽盆地长岭凹陷内孤店 CO₂ 气田含片钠铝石砂岩中 CO₂ 注入之后形成的矿物主要为片钠铝石、铁白云石,固碳量为 58.47 kg/m³。可以预测,经过长期的 CO₂-砂岩相互作用,中神监 X 井石千峰组砂岩将形成以片钠铝石、方解石和铁白云石为代表的固碳矿物。其固碳量,参照以上 CO₂ 储集砂岩,预测以矿物圈闭形式固结的 CO₂ 可以达到 40~60 kg/m³(砂岩)。

红色泥岩(Fe₂O₃ 含量比 FeO 高)在 CO₂ 注入后可形成 CO₂ 流体,改变围岩矿物学特征,活化微量金属,溶解赤铁矿颗粒包壳,反应的化学方程式如下:



(Wigley *et al.*, 2012)

被活化的金属离子随溶液运移,在漂白砂岩和未漂白砂岩之间的反应面富集沉淀,形成次生氧化物和碳酸盐沉淀带。犹他州格林河附近红色砂岩被沿断层向上运移的富 CO₂ 的还原性流体漂白,漂白发生在断层附近,漂白砂岩和邻近未漂白砂岩的矿物学和地球化学数据表明,砂岩的漂白与赤铁矿颗粒包壳的溶解有关。

中神监 X 井石千峰组中泥岩以夹层的形式分布在砂岩储层中(图 1),单层厚度 < 11 m,为红色泥岩,预测在 CO₂ 注入后会发金属离子活化,不溶于水的 Fe₂O₃ 被还原为 Fe²⁺,导致红色泥岩褪色,随流体运移,遇氧化环境时以褐铁矿形式沉淀下来,可能导致渗透率降低。

5 结论

(1) 鄂尔多斯盆地伊金霍洛旗附近中神监 X 井石千峰组砂岩岩石类型为长石岩屑砂岩和岩屑长石砂岩,粒度多为中-细粒,少量为粗粒,分选差,呈棱角-次圆状,成分成熟度较低,胶结物主要为方解石。泥岩为含粉砂钙质泥岩,以粘土矿物为主,其次为粉砂级碎屑,粉砂级碎屑主要为石英,其次为长石,其中粘土矿物以伊利石为主,其次为蒙皂石、高岭石和绿泥石。

(2) 砂岩样品的主要氧化物为 SiO₂,其次为

Al₂O₃、Fe₂O₃ 和 CaO、FeO、MgO、K₂O 和 Na₂O 少量。泥岩中的氧化物含量的数量级与砂岩相似,表现为以 SiO₂ 为主,其次为 Al₂O₃、Fe₂O₃、CaO、FeO、MgO、K₂O 和少量 Na₂O。

(3) 根据砂岩岩石类型预测经过长期的 CO₂-砂岩相互作用,中神监 X 井石千峰组砂岩将形成以片钠铝石、方解石和铁白云石为代表的固碳矿物,其固碳量,预测可以达到 50~60 kg/m³(砂岩)。

(4) 中神监 X 井石千峰组红色泥岩在 CO₂ 注入后会发金属离子活化,不溶于水的 Fe₂O₃ 被还原为 Fe²⁺,导致红色泥岩褪色,随流体运移,遇氧化环境时以褐铁矿形式沉淀下来,可能导致渗透率降低。

References

- Bachu S. 2008. Legal and regulatory challenges in the implementation of CO₂ geological storage: An Alberta and Canadian perspective[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2: 259~273.
- Bachu S, Gunter W D and Perkins E H. 1994. Aquifer disposal of CO₂: hydrodynamic and mineral trapping[J]. *Energy Conversion and Management*, 35: 269~279.
- Baines S J and Worden R H. 2004. Geological storage of carbon dioxide[J]. *Geological Society*, 233: 1~6.
- Emberley S, Hutcheon I and Shevalier M. 2004. Geochemical monitoring of fluid-rock interaction and CO₂ storage at the Weyburn CO₂-injection enhanced oil recovery site, Saskatchewan, Canada[J]. *Energy*, 29: 1393~1401.
- Gao Yuqiao, Liu Li, Qu Xiyu, *et al.* 2008. Petrologic characteristics of dawsonite-bearing sandstones in Wuerxun Sag of Hailaer Basin and Gudian CO₂ Gasfield in Songliao Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 10(2): 111~123 (in Chinese with English abstract).
- Gaus I. 2010. Role and impact of CO₂-rock interactions during CO₂ storage in sedimentary rocks[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 4: 73~89.
- Gaus I, Azaroual M and Czernichowski-Lauriol I. 2005. Reactive transport modelling of the impact of CO₂ injection on the clayey cap rock at Sleipner (North Sea)[J]. *Chem. Geol.*, 217: 319~337.
- Gentzis T. 2000. Subsurface sequestration of carbon dioxide-an overview from an Alberta (Canada) perspective[J]. *International Journal of Coal Geology*, 43: 287~305.
- Gunter W D, Wiwchar B and Perkins E H. 1997. Aquifer disposal of CO₂-rich greenhouse gases: extension of the time scale of experiment for CO₂-sequestering reactions by geochemical modeling[J]. *Mineralogy and Petrology*, 59: 121~140.
- Holloway S. 2001. Storage of fossil fuel-derived carbon dioxide beneath the surface of the earth[J]. *Energy Environ.*, 26: 145~166.

- Johnson J W, Nitao J J, Steefel C I, *et al.* 2001. Reactive transport modeling of geologic CO₂ sequestration in saline aquifers: the influence of intra-aquifer shales and the relative effectiveness of structural, solubility, and mineral trapping during prograde and retrograde sequestration [A]. The First National Conference on Carbon Sequestration, Washington D C, May 14~17, 2001 [C].
- Johnson J W, Nitao J J and Steefel C I. 2002. Fundamental elements of geologic CO₂ sequestration in saline aquifers [J]. ACS Fuel Chemistry Division Symposia Preprints, 47: 41~42.
- Ketzer J M, Iglesias R, Einloft S, *et al.* 2009. Water-rock-CO₂ interactions in saline aquifers aimed for carbon dioxide storage: Experimental and numerical modeling studies of the Rio Bonito Formation (Permian), southern Brazil [J]. Applied Geochemistry, 24: 760~767.
- Lan Zhaoli, Zhang Junfeng, Tao Weixiang, *et al.* 2011. Sedimentary microfacies and diagenesis of Shiqianfeng reservoir in Shenmu gasfield [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 26(1): 28~33 (in Chinese with English abstract).
- Liu Na. 2011. Mineral trapping capacity estimation of CO₂ in sandstones: Constraints from the dawsonite-bearing sandstone in Honggang, southern part of Songliao Basin [D]. Jilin: College of Earth Sciences, Jilin University (in Chinese with English abstract).
- Martin I and Philip R. 2009. Evaluating the impact of fractures on the performance of the In Salah CO₂ storage site [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 4: 242~248.
- Metz B, Davidson O, de Coninck H C, *et al.* 2005. IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge, United Kingdom/New York USA: Cambridge University Press, 442~431.
- Oelkers E H, Sigurdur R, Gislason, *et al.* 2009. Mineral Carbonation of CO₂ [J]. Elements, 4: 333~337.
- Ortoleva P J, Dove P and Richter F. 1998. Geochemical perspectives on CO₂ sequestration [A]. Wawersik W R and Rudnicki J W. US Department of Energy Workshop on "Terrestrial Sequestration of CO₂-An Assessment of Research Needs [C]. 20~28.
- Peter J C. 2009. Demonstration and Deployment of Carbon Dioxide Capture and Storage in Australia [J]. Energy Procedia, 1: 3 859~3 866.
- Shukla R, Ranjith P, Haque A, *et al.* 2010. A review of studies on CO₂ sequestration and caprock integrity [J]. The Science and Technology of Fuel and Energy, 89: 2 651~2 664.
- Ryzhenko B N. 2006. Genesis of dawsonite mineralization: Thermodynamic analysis and alternatives [J]. Geochemistry International, 44 (8): 835~840.
- Wan Yuyu. 2012 Migration and Transformation of CO₂ in CO₂ Geological Sequestration Process of Shiqianfeng Saline Aquifers in Ordos Basin [D]. Jilin: Environment and Resources, Jilin University (in Chinese with English abstract).
- Wigley Max, Kampman Niko, Dubacq Benoit, *et al.* 2012. Fluid-mineral reactions and trace metal mobilization in an exhumed natural CO₂ reservoir, Green River, Utah [J]. Geological Society of America, 40(6): 555~558.
- Worden R H. 2006. Dawsonite cement in the Triassic Lam Formation, Shabwa Basin, Yemen: A natural analogue for a potential mineral product of subsurface CO₂ storage for greenhouse gas reduction [J]. Marine and Petroleum Geology, 23: 61~77.
- Zeng Yunfu and Xia Wenjie. 1986. Sedimentary Petrology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 255~260 (in Chinese).
- Zhang Chaoyu, Li Shengtao, Yang Fengtian, *et al.* 2010. Develop CO₂ geological storage, Realization moderate reduction [J]. Natural Resource Economics of China, 24(3): 24~26 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Manlang, Li Xizhe, Gu Jiangrui, *et al.* 2009. Sequence Division and Evolution of Upper Paleozoic in the Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 27(2): 289~298 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiang, Tian Jingchun, Chen Hongde, *et al.* 2009. The lithofacies-paleogeographic and spatiotemporal evolution of Upper Permian Shiqianfeng Formation in Ordos Basin, China [J]. Journal Of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 30(2): 165~171.

附中文参考文献

- 高玉巧, 刘立, 曲希玉, 等. 2008. 海拉尔盆地乌尔逊凹陷与松辽盆地孤店 CO₂ 气田含片钠铝石砂岩的岩石学特征 [J]. 古地理学报, 10(2): 111~123.
- 兰朝利, 张军峰, 陶维祥, 等. 2011. 神木气田石千峰组储层沉积微相与成岩作用 [J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 26(1): 28~33.
- 刘娜. 2011. 砂岩对 CO₂ 的矿物捕获能力——来自松辽盆地南部红岗地区含片钠铝石砂岩的约束 [D]. 吉林: 吉林大学地球科学学院.
- 万玉玉. 2012. 鄂尔多斯盆地石千峰组咸水层 CO₂ 地质储存中 CO₂ 的迁移转化特征 [D]. 吉林: 吉林大学环境资源学院.
- 张超宇, 李胜涛, 杨丰田, 等. 2010. 开展 CO₂ 地质储存, 实现适度减排 [J]. 中国国土资源经济, 24(3): 24~26.
- 张满郎, 李熙喆, 古江锐, 等. 2009. 鄂尔多斯盆地上古生界层序地层划分及演化 [J]. 沉积学报, 27(2): 289~298.
- 张翔, 田景春, 陈洪德, 等. 2009. 鄂尔多斯盆地上二叠统石千峰组岩相古地理及时空演化 [J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 30(2): 165~171.
- 曾允孚, 夏文杰. 1986. 沉积岩石学 [M]. 北京: 地质出版社, 255~260.