

鄂尔多斯盆地 JX 井延长组砂岩固碳潜力分析^①

明晓冉¹ 刘立¹ 刘娜娜¹ 宋土顺¹ 王福刚² 于严龙¹

(1.吉林大学地球科学学院 长春 130061;2.吉林大学环境与资源学院 长春 130021)

摘要 神华集团在我国 CO₂ 地下埋藏的潜在目标区(鄂尔多斯盆地)实施的 CO₂ 注入工程仍存在有关其注入层之上泥岩盖层安全性方面的争议。通过对与神华集团 CO₂ 注入井相邻且钻遇地层系统、岩石组合一致的 JX 井三叠系延长组(位于注入层之上)的研究预测一旦 CO₂ 透过盖层后的再续固碳能力。研究层位岩屑样品类型主要为长石砂岩和岩屑长石砂岩,其次为岩屑砂岩和岩屑石英砂岩;其物源区岩石类型主要为长英质火山岩、其次为中性火山岩及少量富含石英的沉积岩,具中性斜长岩成分特征;其上段(466~534 m)及下段(666~958 m)砂岩母岩受到弱—中等化学蚀变,并可能经历了再旋回过程;中段(534~666 m)砂岩母岩未受化学蚀变影响,并可能为第一次旋回沉积物。作为潜在的 CO₂ 再续固碳场所,延长组砂岩具有实现 CO₂ 矿物圈闭的物质条件及形成片钠铝石、方解石、铁白云石和菱铁矿等固碳矿物的潜力。

关键词 鄂尔多斯盆地 延长组 岩石学 地球化学 固碳潜力

第一作者简介 明晓冉 男 1988 年出生 博士研究生 沉积岩石学 E-mail: mingy1@163.com

通讯作者 刘立 男 教授 E-mail: liuli0892@vip.sina.com

中图分类号 P584 **文献标识码** A

0 引言

温室效应问题正日益受到人们关注,减少向大气系统释放的 CO₂ 量是直接且有效的解决手段,而 CO₂ 地质封存又是减少其排放的有效方法之一^[1-3]。其原理为:CO₂ 以通过与深部咸水层、深部煤层、枯竭的油气田或深部海洋^[4-7] 中的岩石作用形成碳酸盐矿物的方式完成固定,即完成 CO₂ 的矿物捕获。目前,世界上已有十余个国家开展或正在开展咸水层埋存 CO₂ 和 CO₂ 驱油(EOR)与埋存工程^[8],如挪威北海 Sleipner 项目、阿尔及利亚 In Salah 项目和加拿大 Weyburn 项目等^[9-14]。

我国这方面研究起步较晚,工业上主要将 CO₂ 注入技术应用于提高石油采收率^[15]。中国神华鄂尔多斯煤制油分公司在我国 CO₂ 地下埋藏的潜在目标区(鄂尔多斯盆地)开展了国内首个 CO₂ 捕集与埋存(CCS)示范工程。与其他 CCS 项目相比,该区注入层位之上泥岩盖层的封闭性一直受到争议。笔者通过对与神华集团 CO₂ 注入井相邻且钻遇地层系统、岩石组合一致的 JX 井之三叠系延长组(位于注入层之上)砂岩进行岩石学、地球化学方面研究,以期明确上部延长组砂岩层对透过泥岩盖层的 CO₂ 的再续固

碳能力。

1 取样与研究方法

JX 井地处鄂尔多斯盆地北部呈东西向展布的伊盟隆起带东缘(伊金霍洛旗附近),位于 CO₂ 注入区之内。钻遇古生界、中生界及新生界地层,其中石炭系与奥陶系、第四系与白垩系地层间呈不整合接触关系。JX 井与神华集团 CO₂ 注入井相邻,两者具有相同的钻遇地层系统和岩石组合。注入井的 CO₂ 埋存层位在 1 545 m 之下,本文所研究的延长组(埋深 446~958 m,厚 512 m)岩性组合特征与注入层位类似,但其泥岩层厚度相对增加,其成为 CO₂ 再续固定场所的可能性较大。延长组下部为深灰色泥岩、棕红色泥岩、黑色泥岩、浅灰色中砂岩和浅灰色砂岩互层;中部为灰色泥岩、浅灰色细砂岩、浅灰色中砂岩互层;上部为浅灰色中砂岩和浅灰色砂岩夹灰色泥岩。

对采集的 31 件钻井岩屑样品(图 1)进行了钻井过程中可能的上部掉块剔除和选定部分的清洗、烘干等处理。在上部掉块剔除过程中,首先依次确定每件样品的主要岩块和异常岩块,仔细剔除与样品总体特征不协调的岩块。然后,为尽可能的避免钻井泥浆对样品的污染,对选定的岩块分别进行了多次清洗并烘

^①中国地质调查局“全国二氧化碳地质储存潜力评价与示范工程”计划项目之“二氧化碳地质储存的机理与数值模拟研究”工作项目(编号:1212011120048)与国家科技重大专项(编号:2011ZX05016-002)联合资助
收稿日期:2013-12-25;收修改稿日期:2014-03-17

干。为保证所挑选的岩屑样品的可靠性,另外采集并切制了 4 件岩芯样品(图 1)作为对岩屑样品挑选的约束。对于岩屑样品和岩芯样品切制的薄片均采用日产 OLYMPUS 偏光显微镜进行了骨架碎屑成分鉴定和统计。在此基础上,选出 11 件岩屑样品,在吉林大学实验测试中心对其进行了常量元素、稀土元素、微量元素分析。其中:常量元素分析是利用 PW1404/10 型 X 射线荧光光谱仪完成的;稀土、微量元素分析是利用 Agilent 公司生产的 7500a 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)完成的。

当(1%~2%,平均 1.2%)(图 3e,f)。黑云母往往发生绿泥石化。(图 3f)。

碎屑颗粒粒径为 0.01~1.7 mm,主要分布区间为 0.15~0.5 mm,为中—细粒碎屑结构。碎屑呈次圆—次棱角状(图 3c,d)。碎屑颗粒间以点—线接触为主,呈颗粒支撑关系(图 3a)。胶结物主要为方解石(3%~10%,平均 6.18%),并以粗晶为主,局部见粗晶方解石交代碎屑长石(图 3a,d)等。孔隙式胶结(图 3a,d)。碎屑颗粒边部见少量黏土包壳(图 3e),颗粒之间见有少量杂基(2%~4%,平均 2%)(图 3f)。

2.2 岩芯样品

岩石类型主要为岩屑长石砂岩,其次为长石砂岩(图 2)。骨架碎屑为石英(45%~56%,平均 53.4%)、长石(15%~25%,平均 16.6%)、岩屑(4%~10%,平均 6%),绿泥石含量较岩屑样品偏高(3%~4%,平均 3.2%)。各矿物鉴定特征与岩屑薄片鉴定结果相似,故在此省略。碎屑颗粒粒径为 0.05~1.4 mm,主要分布在 0.25~0.85 mm 之间,为粗—中粒碎屑结构;分选好—中等,次圆—次棱角状,点—线接触为主。胶结物主要为浊沸石,方解石少量。

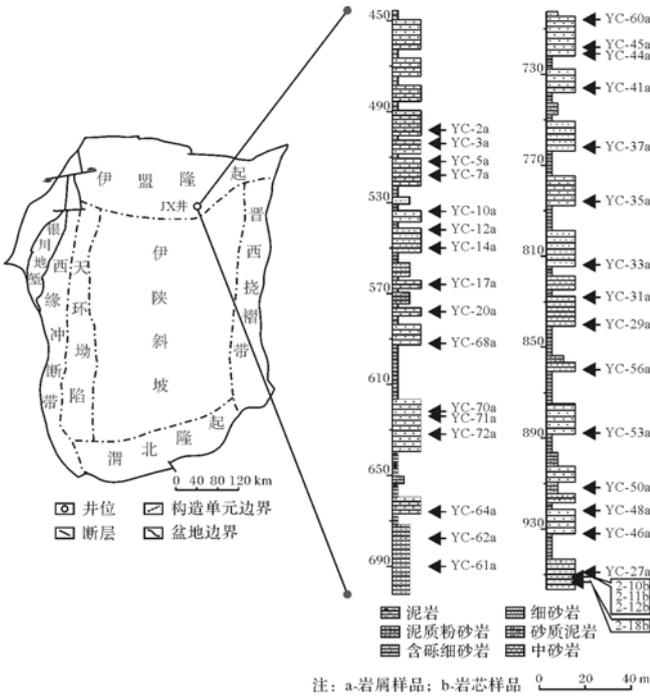


图 1 JX 井延长组岩性柱状图及取样位置

Fig.1 Lithologic log of JX Well of Yanchang Formation and sample location

2 延长组砂岩岩石学特征

2.1 岩屑样品

骨架碎屑成分统计表明,岩屑样品的岩石类型主要为长石砂岩和岩屑长石砂岩,其次为岩屑砂岩和岩屑石英砂岩(图 2)。骨架碎屑以石英(40%~70%,平均 56.4%)为主,其次为长石(5%~35%,平均 19.68%)和岩屑(5%~25%,平均 11.09%)。碎屑石英以单晶为主,多晶石英少量(图 3a~f)。长石主要为斜长石,其次为钾长石,可见微弱绢云母化及高岭土化蚀变(图 3b~e)。岩屑主要为变质岩岩屑和火山岩岩屑。非骨架碎屑见有云母和绿泥石,其含量相

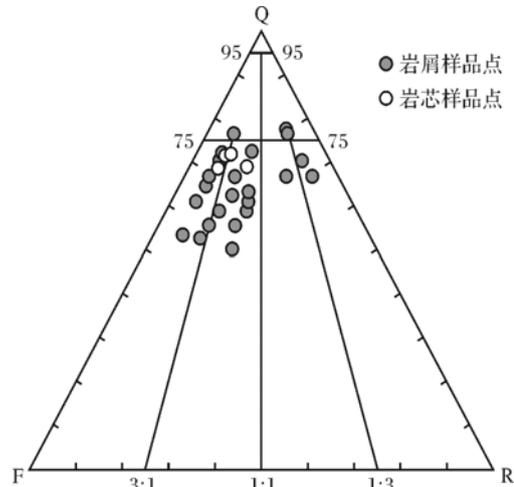


图 2 样品的骨架碎屑成分三角图

Fig.2 Triangle diagram of detrital components of samples

2.3 物源岩石类型

根据物源岩石类型判别函数(表 1)、图解(图 4)^[16]及各氧化物含量(表 2):图 4a 中大部分点落于长英质火成岩区域内,仅有 2 个点落于石英沉积岩区域,其余 1 个落于中性火山岩区域;图 4b 中大部分点落于长英质火山岩物源区,其余 3 个点落于中性火山岩物源区。因此,砂岩物源岩石类型主要为长英质火山岩,其次为中性火山岩及少量石英沉积岩。

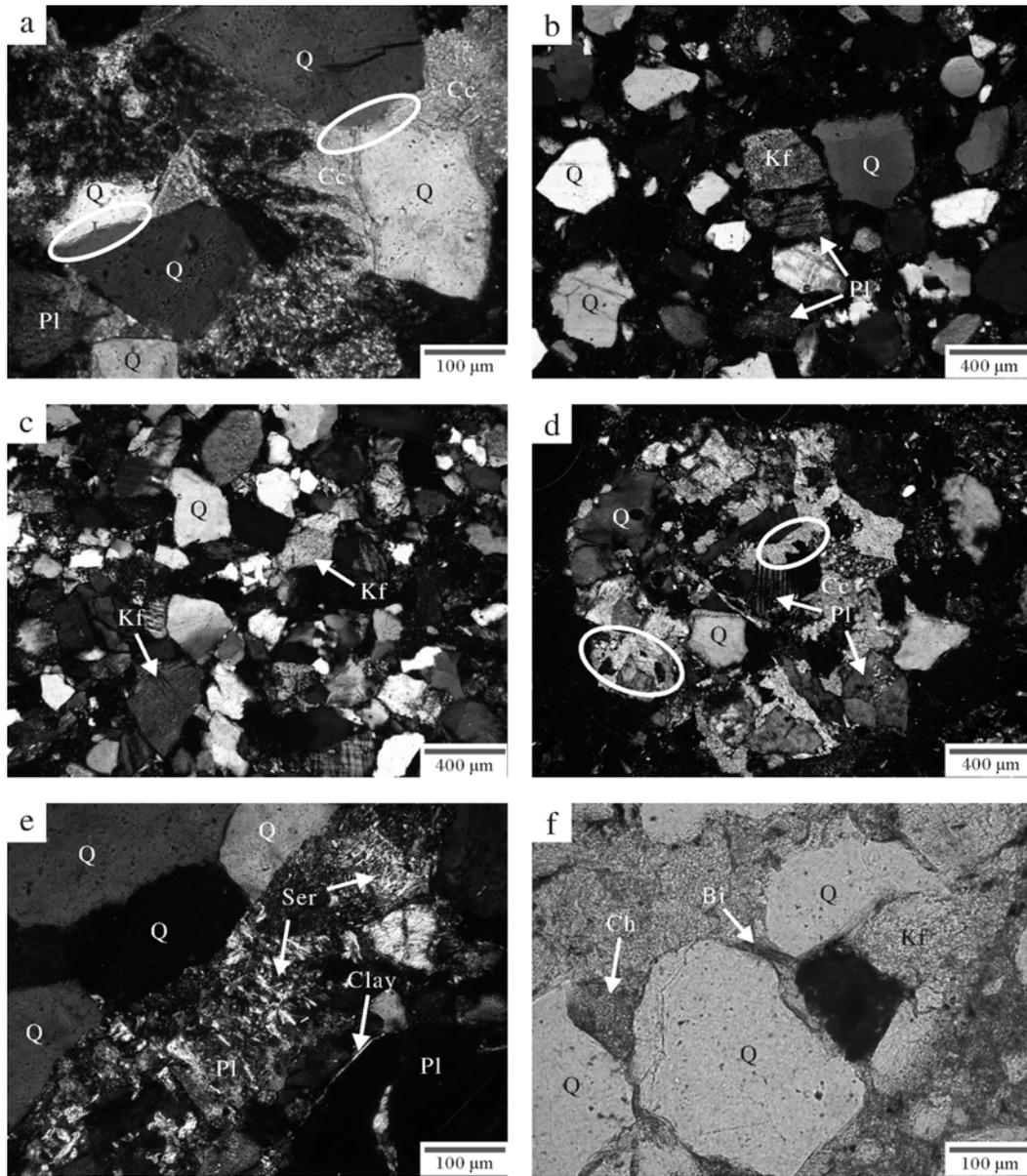


图3 岩屑样品薄片显微特征照片

Fig.3 Photomicrographs showing characteristics of drilling cutting in thin section

a.石英(Q)颗粒之间点(P)—线(L)接触关系与碳酸盐(Cc)胶结物, YC-5, 延长组, 512 m, 正交偏光; b.斜长石(Pl)绢云母化与钾长石(Kf)高岭石化, YC-61, 延长组, 690 m, 正交偏光; c.颗粒分选好—中等, 磨圆度为次圆—次棱角状, 钾长石高岭石化, YC-60, 延长组, 706 m, 正交偏光; d.方解石交代长石与斜长石绢云母化, YC-35, 延长组, 786 m, 正交偏光; e.斜长石边部的黏土矿物(Clays)包壳与斜长石绢云母化, YC-27, 延长组, 949 m, 正交偏光; f.孔隙中的绿泥石(Ch)与黑云母(Bi)的绿泥石化现象, YC-5, 延长组, 512 m, 单偏光。

表1 物源区岩石类型判别函数系数及常数

Table 1 Coefficient and constant of provenance origin discriminant function

系数	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O _{3(总)}	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	常数
F1	-1.773	0.607	0.760	-1.500	0.616	0.509	-1.224	-9.090
F2	0.445	0.070	-0.250	-1.142	0.438	1.475	1.426	-6.861
系数	TiO ₂ /Al ₂ O ₃	Fe ₂ O _{3(总)} /Al ₂ O ₃	MgO/Al ₂ O ₃	Na ₂ O/Al ₂ O ₃	K ₂ O/Al ₂ O ₃	常数		
F1'	30.638	-12.541	7.329	12.031	35.402	-6.382		
F2'	56.500	-10.879	30.875	-5.404	11.112	-3.890		

注:判别公式: $F = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n + C$, $x_1 - x_n$ 为上述常量元素百分含量或其比值, $a_1 - a_n$ 为其对应的系数, C 为常数。

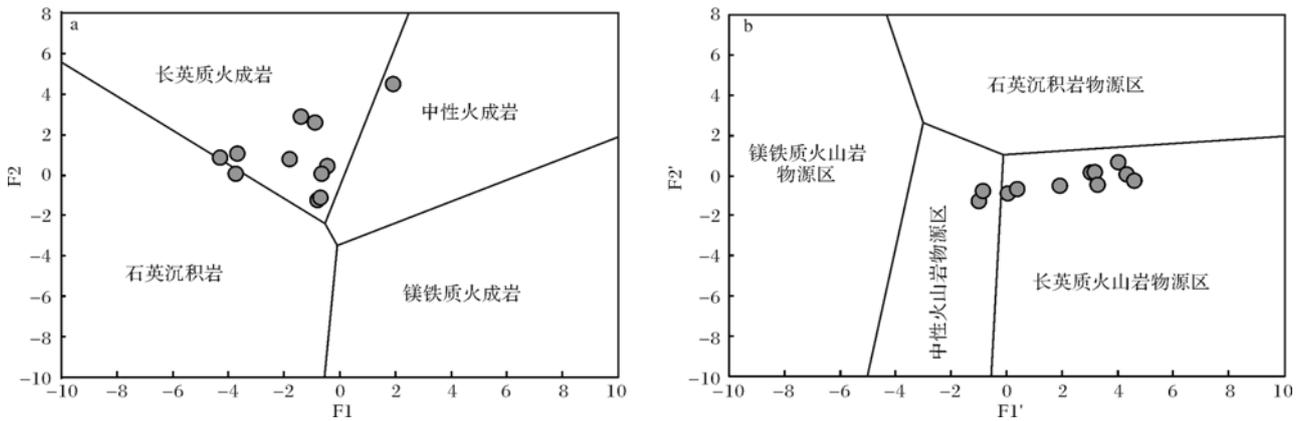


图 4 岩屑样品物源岩石类型判别图解(图解据[16],数据点位为本次研究实测)

Fig.4 Provenance origin of drilling cutting

(chart according to [16], data points are measured in this study)

3 延长组砂岩地球化学特征

3.1 常量元素

岩屑样品中氧化物(表 2)主要为 SiO₂(60.14%~77.06%, 平均 69.34%), 其次为 Al₂O₃(10.92%~15.77%, 平均 13.32%)、K₂O(2.45%~3.13%, 平均 2.85%)、Na₂O(1.77%~3.87%, 平均 2.64%), 含少量 MgO(0.78%~1.88%, 平均 1.35%)、Fe₂O₃(0.21%~3.34%, 平均 1.89%)、FeO(1.14%~4.39%, 平均 1.87%)和 CaO(0.91%~8.74%, 平均 2.78%)。其中,

w(SiO₂+Al₂O₃)(72.73%~88.47%, 平均为 82.66%) 远高于 w(Fe₂O₃+FeO+MgO)(3.29%~6.45%, 平均为 5.12%)。

金属元素丰度换算结果显示,除 Ca(0.65%~6.24%, 平均 1.98%)以外,Al(5.78%~8.35%, 平均 7.05%)、Na(1.31%~2.87%, 平均 1.96%)、Mg(0.47%~1.13%, 平均 0.81%)、Fe(1.78%~3.56%, 平均 2.77%)元素丰度均大于其在砂岩中的平均值(砂岩中 Ca 平均 3.91%、Al 平均 2.5%、Na 平均 0.33%、Mg 平均 0.7%、Fe 平均 0.98%^[17-18])。金属元素的高丰

表 2 岩屑样品常量元素测试分析结果及相关参数(单位:ω(B)/10⁻²)

Table 2 Analytical results of major elements of drilling cutting and relevant parameter(unit: ω(B)/10⁻²)

样品号	YC-2	YC-10	YC-68	YC-70	YC-64	YC-60	YC-37	YC-35	YC-33	YC-53	YC-50	平均值
深度/m	498	534	592	622	666	706	762	786	814	888	912	—
SiO ₂	77.06	76.82	60.14	67.04	66.32	75.72	66.90	66.24	69.66	68.86	68.02	69.34
Al ₂ O ₃	11.41	10.92	12.59	13.03	13.61	11.28	15.77	15.32	13.24	14.57	14.76	13.32
K ₂ O	3.11	2.77	2.66	3.10	3.01	2.97	2.85	2.69	3.13	2.58	2.45	2.85
Na ₂ O	2.45	1.89	3.87	3.21	3.19	2.53	2.41	3.07	2.43	1.77	2.18	2.64
MgO	0.91	0.78	1.88	1.62	1.53	0.95	1.44	1.78	1.20	1.25	1.54	1.35
Fe ₂ O ₃	1.19	1.29	2.39	1.81	1.65	1.38	2.19	2.14	0.21	3.34	3.17	1.89
FeO	1.19	1.24	1.4	1.14	1.81	1.45	2.22	2.53	4.39	1.45	1.71	1.87
CaO	0.91	1.69	8.74	4.70	4.17	1.67	1.47	1.91	2.12	1.54	1.64	2.78
TiO ₂	0.30	0.35	0.44	0.42	0.51	0.46	0.55	0.55	0.62	0.56	0.61	0.49
P ₂ O ₅	0.08	0.08	0.08	0.08	0.11	0.08	0.13	0.16	0.16	0.08	0.11	0.10
MnO	0.06	0.08	0.12	0.08	0.06	0.04	0.08	0.10	0.12	0.12	0.10	0.09
LOI	1.43	2.33	6.09	3.94	3.62	1.50	3.41	2.97	3.12	3.43	3.33	3.20
合计	100.10	100.24	100.4	100.16	99.58	100.02	99.42	99.46	100.41	99.55	99.62	99.91
CIA	55.76	54.33	44.64	48.35	49.74	52.00	61.86	57.26	54.09	63.14	61.55	54.79
ICV	0.78	0.81	1.60	1.15	1.04	0.89	0.70	0.80	0.74	0.77	0.79	0.92

注:测试单位为吉林大学测试中心;CIA=Al₂O₃/(Al₂O₃+CaO*+Na₂O+K₂O)×100,式中氧化物均为摩尔含量,CaO*为校正值(CaO与Na₂O的摩尔比值小于1,则mCaO*=mCaO,若摩尔比值大于1,则mCaO*=mNa₂O^[19]);ICV=(Fe₂O₃+K₂O+Na₂O+CaO+MgO+MnO+TiO₂)/Al₂O₃;LOI为烧失量。

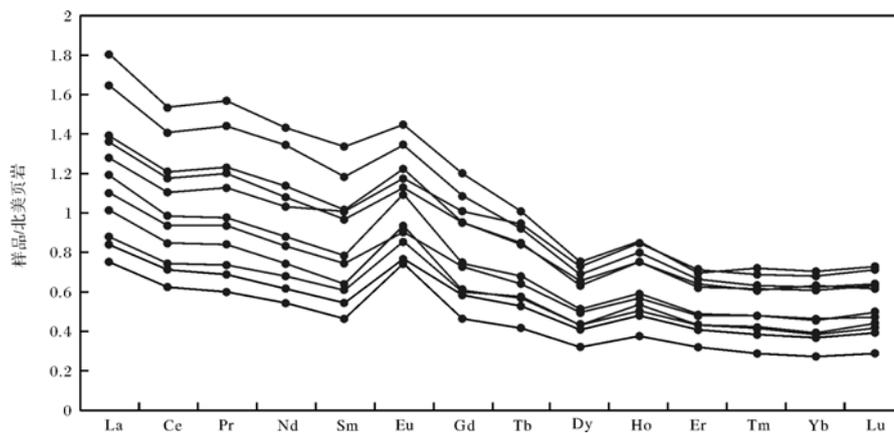


图5 岩屑样品稀土元素配分模式

Fig.5 REE patterns of drilling cutting

度保证了矿物溶蚀溶解过程中的高阳离子供给量。

3.2 稀土元素与微量元素

岩屑样品稀土总量 (ΣREE) 为 $102.77 \times 10^{-6} \sim 256.59 \times 10^{-6}$ (图5), 平均值 (171.33×10^{-6}) 与北美页岩 (173.21×10^{-6})^[20] 接近; 轻重稀土元素比值 (LREE/HREE) 为 10.50~13.65, 平均为 12.60, 表明轻稀土元素富集而重稀土元素亏损; δEu 值差异能够反映岩石类型的不同, 本文 δEu 为 1.14~1.60, 平均为 1.31, 表现出正异常特征, 且介于中性斜长岩的含量范围内 ($1.01 < \delta\text{Eu} < 2.33$)^[21]; Ce_{anom} 为 -0.05 ~ -0.03, 平均为 -0.04, 表明砂岩沉积时水体为还原环境^[22], 这与该组砂岩多为浅灰色这一事实是相符合的。REE 配分曲线(图5)相互平行, 轻稀土元素部分较陡而重稀土元素曲线较平缓。微量元素 Th 含量在 $4.94 \times 10^{-6} \sim 11.91 \times 10^{-6}$ 之间, 平均为 8.19×10^{-6} ; U 含量在 $1.21 \times 10^{-6} \sim 2.2 \times 10^{-6}$ 之间, 平均为 1.73×10^{-6} 。Th/U 比值在 3.45~6.31 之间, 平均为 4.66, 反映源区主要为长英质火山岩^[23]。

上述判断与物源分析得出的砂岩母岩类型主要为长英质火山岩, 其次为中性火山岩及少量石英沉积岩的结果是一致的, 均反映出砂岩及其母岩长石含量丰富的特点。

3.3 风化作用强度指标

砂岩矿物组成不仅与原始成分有关, 还受母岩风化作用的影响。CIA、ICV 及 Th/U 指标可分别用于判断母岩风化作用强度与组分特征。根据图6中各曲线变化规律及各指标分界值(虚线所示), 可将其以 534 m、666 m 为界分为三段, 即上段(466~534 m)、中段(534~666 m)和下段(666~958 m)。CIA 值(44.64~64.19, 平均 55.58) (表2) 变化如图6a 所

示: 上段、下段砂岩 CIA 值介于 52~64.19, 平均 57.98; 中段砂岩 CIA 值介于 44.64~49.74, 平均 47.58。ICV 值(0.70~1.60, 平均 0.91) (表2) 变化如图6b 所示: 上、下段砂岩 ICV 介于 0.7~0.91, 平均 0.8; 中段砂岩 ICV 值介于 1.04~1.6, 平均 1.26。Th/U 值变化趋势(图6c)与 CIA 值类似, 除 YC-10、YC-68 和 YC-70 三个样品外, 其余样品 Th/U 值(3.45~6.31) 均大于 4。

前人研究表明, $\text{CIA} < 50$ 表示物源区岩石未受化学蚀变作用影响^[24], 在 50~60、60~80 范围内代表其受弱、中等化学蚀变作用影响^[25], $\text{Th}/\text{U} > 4$ 表示受到风化作用影响。另外, ICV 值大于 1 表示砂岩可能为第一次旋回沉积物; ICV 值小于 1 表示砂岩可能经历再旋回过程, 或者为经过强烈风化的第一次旋回沉积物^[26], 因此, 上段及下段砂岩母岩受到弱—中等化学蚀变, 并可能经历了再旋回过程; 中段砂岩母岩未受化学蚀变影响, 并可能为第一次旋回沉积物(图6a, b, c)。这表明砂岩母岩总体风化程度较弱, 即使易受风化作用影响的铝硅酸盐类矿物(主要为长石)也可以得到完整保存。

4 延长组砂岩固碳潜力分析

前文所述部分岩石学特征及全部地球化学特征均来自对岩屑样品测试结果的分析, 但在测试之前, 岩屑样品均经过了严格的岩性比对、剔除杂质、清洗烘干等处理。此外, 岩屑和岩芯样品的骨架碎屑成分统计表明, 二者在骨架碎屑成分上具有可比性。因此, 根据岩屑样品进行岩石类型研究是可行的。

神华集团 CO_2 注入井注入层顶部之上至延长组底部之下地层中多为棕红色泥岩与浅红/浅灰色砂岩

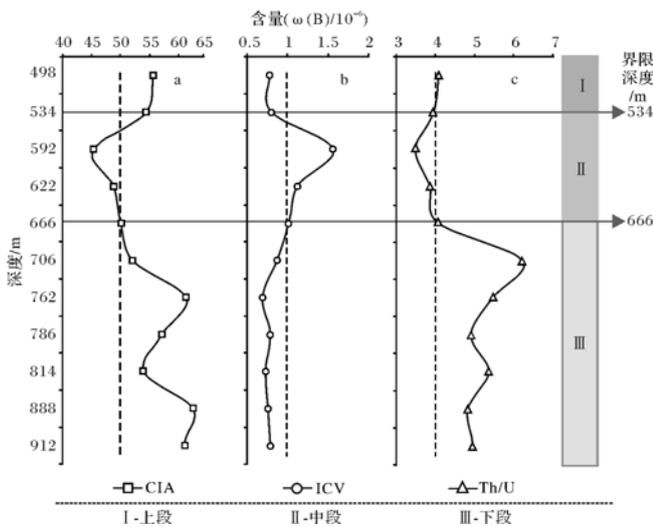


图6 化学蚀变指标(CIA)、化学组分指标(ICV)和 Th/U 比值变化趋势

a. CIA 值随深度变化曲线; b. ICV 值随深度变化曲线; c. Th/U 比值随深度变化曲线; I. 上段; II. 中段; III. 下段

Fig.6 Trend chart of chemical index alteration(CIA), index chemical variation(ICV) and Th/U ratio

互层,其中泥岩层厚度在 2~12 m 之间,间或可见深灰、灰绿色泥岩。延长组内泥岩为深灰色,厚度在 2~24 m 之间,虽然颜色及厚度较下部层位泥岩发生较明显变化,但与国内外长期发育的典型 CO₂ 气藏相比,注入层之上盖层无论岩性还是厚度均无可比性,如挪威北海 Sleipner 项目 CO₂ 注入层上部暗色泥岩盖层厚度为 200~300 m^[27]。CO₂ 注入层最上部之上地层中缺乏巨厚的区域暗色泥岩盖层,随着时间的推移,可能出现 CO₂ 因浮力及流体压力大于泥岩毛细管吸入压力^[27] 等因素发生缓慢向上运移并透过泥岩层的情况,进而使注入层上部砂岩成为再续固碳的场所。注入层之上延长组发育有较厚暗色泥岩层,另外,其单层砂岩厚度在 1~31 m 之间,而注入层位内砂岩厚度在 1~29 m 范围内,两者的储集层厚度大体相当,因此,一旦发生 CO₂ 泄露,延长组可能成为首要的 CO₂ 聚集层位。

众所周知,CO₂ 通过人工或自然方式进入含水砂岩后可通过溶于水形成碳酸的形式使地层流体变为弱酸性^[28],而这种弱酸性环境导致的不稳定骨架碎屑(如长石)及胶结物(如方解石)发生溶蚀、溶解所释放的阳离子正是诸如方解石^[29]、菱铁矿、白云石及片钠铝石等固碳矿物^[30] 生成所必须的成分。根据样品金属元素丰度与砂岩平均金属元素丰度的比较结果判断,延长组砂岩易于释放更多的金属阳离子。而

作为阳离子主要物质来源的长石被视为是最有潜力提高 CO₂ 储存能力的矿物^[31],其含量将影响 CO₂ 的最终捕获效果。需要说明的是,形成上述碳酸盐矿物所需阳离子可能少数来源于地层水。另外,长石也不等量赋存于各类岩屑中,因此长石及岩屑的含量都将影响砂岩的固碳能力,即富长石、岩屑的砂岩对 CO₂ 的矿物捕获能力较强,而作为砂岩骨架碎屑成分之一的石英基本不受 CO₂ 注入的影响。

延长组砂岩母岩仅部分遭受了弱—中等化学蚀变作用,从而确保了易风化硅酸盐矿物的大量保存。对样品的薄片鉴定结果也显示,岩石类型主要为长石砂岩和岩屑长石砂岩,其次为岩屑砂岩和岩屑石英砂岩,其中长石含量为 5%~35%,并且斜长石含量大于钾长石,岩屑含量达到 5%~35%,平均为 19.68%。前人对长石溶蚀的热力学研究表明^[32],在相同温度条件下,其三端元组分溶蚀强度由弱到强的顺序为钾长石、钠长石、钙长石,因此该组砂岩在与饱和 CO₂ 孔隙流体反应过程中可能将遭受较强溶蚀。

另外,延长组砂岩岩石类型与国内外典型 CO₂ 气藏的储集层砂岩的岩石类型是相似的。例如,松辽盆地南部扶新隆起^[33] 及海拉尔盆地乌尔逊凹陷^[34-35] CO₂ 储集砂岩的主要岩石类型为长石砂岩和岩屑长石砂岩;东海盆地丽水凹陷储集砂岩则主要为岩屑砂岩及长石岩屑砂岩^[36];澳大利亚 Bowen-Gunnedah-Sydney 盆地系中含片钠铝石砂岩多为岩屑砂岩^[37]。在上述 CO₂ 气藏或古 CO₂ 气藏的储集砂岩中,幔源 CO₂—砂岩相互作用形成的固碳矿物为片钠铝石、方解石、铁白云石和菱铁矿等,推测研究层位砂岩在 CO₂ 注入后所能形成的自生碳酸盐矿物与此相同。JX 井延长组砂岩具有实现 CO₂ 矿物圈闭的物质基础。通过对自身矿物组成研究及与典型 CO₂ 气藏对比明确了延长组砂岩作为再续固碳场所所具有的物质条件与固碳潜力。

5 结论

(1) 岩屑样品岩石类型主要为长石砂岩和岩屑长石砂岩,其次为岩屑砂岩和岩屑石英砂岩;岩芯样品岩石类型主要为岩屑长石砂岩,其次为长石砂岩。砂岩物源岩石类型主要为长英质火山岩,其次为中性火山岩及少量石英沉积岩,同时具有中性斜长岩成分特征。

(2) 岩屑样品氧化物成分主要为 SiO₂, 其次为 Al₂O₃、K₂O 和 Na₂O, 另含有少量 MgO、Fe₂O₃、FeO 和

CaO;除Ca外,Al、Na、Mg、Fe等的金属元素丰度均大于其在砂岩中的平均值;稀土元素具轻稀土富集、重稀土亏损特征,REE配分曲线彼此平行。砂岩沉积时水体为还原环境。

(3) 以534 m、666 m为分界可将延长组划为具不同风化强度、化学组分的三个深度段:上段(466~534 m)、下段(666~958 m)砂岩母岩受到弱—中等化学蚀变,并可能经历了再旋回过程;中段(534~666 m)砂岩母岩未受化学蚀变影响,并可能为第一次旋回沉积物。

(4) 通过对自身矿物组成研究及与典型CO₂气藏对比明确了延长组砂岩作为再续固碳场所所具有的实现CO₂矿物圈闭的物质条件及形成片钠铝石、方解石、铁白云石和菱铁矿等固碳矿物的潜力。

参考文献 (References)

- Bachu S, Adams J J. Sequestration of CO₂ in geological media in response to climate change: Capacity of deep saline aquifers to sequester CO₂ in solution [J]. *Energy Conversion and Management*, 2003, 44 (20): 3151-3175.
- 李小春,刘延峰,白冰,等. 中国深部咸水含水层CO₂储存优先区域选择[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(5): 963-968. [Li Xiaochun, Liu Yanfeng, Bai Bing, et al. Ranking and screening of CO₂ saline aquifer storage zones in China [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(5): 963-968.]
- 郭建强,张森琦,刁玉杰,等. 深部咸水层CO₂地质储存工程场地选址技术方法[J]. *吉林大学学报:地球科学版*, 2011, 41(4): 1084-1091. [Guo Jianqiang, Zhang Senqi, Diao Yujie, et al. Site selection method of CO₂ geological storage in deep saline aquifers [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2011, 41(4): 1084-1091.]
- Winter E M, Bergman P D. Availability of depleted oil and gas reservoirs for disposal of carbon dioxide in the United States [J]. *Energy Conversion and Management*, 1993, 34(9//10/11): 1177-1187.
- Bachu S, Shaw J. Evaluation of the CO₂ sequestration capacity in Alberta's oil and gas reservoirs at depletion and the effect of underlying aquifers [J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2003, 42(9): 51-61.
- Credoz A, Bildstein O, Jullien M, et al. Experimental and modeling study of geochemical reactivity between clayey cap rocks and CO₂ in geological storage conditions [J]. *Energy Procedia*, 2009, 1(1): 3445-3452.
- 李小春,小出仁,大隅多加志. 二氧化碳地中隔离技术及其岩石力学问题[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(6): 989-994. [Li Xiaochun, Hitoshi K, Takashi O. CO₂ aquifer storage and the related rock mechanics issues [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(6): 989-994.]
- 宋新民,杨思玉. 国内外CCS技术现状与中国主动应对策略[J]. *油气藏评价与开发*, 2011, 1(1/2): 25-30. [Song Xinmin, Yang Siyu. Current situation of CCS technology at home and abroad and the positive strategy that China should adopt toward it [J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2011, 1(1/2): 25-30.]
- IPCC. IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage [M]. Geneva: WMO/UNDP, 2006, 3: 1-112; 5: 1-133.
- Torpa T A, Gale J. Demonstrating storage of CO₂ in geological reservoirs: the Sleipner and SACS projects [J]. *Energy*, 2004, 29(9/10): 1361-1369.
- Moritis G. CO₂ sequestration adds new dimension to oil, gas production [J]. *Oil and Gas Journal*, 2003, 101(9): 71-83.
- 曲建升,曾静静. 二氧化碳捕获与封存:技术、实践与法律——国际推广二氧化碳捕获与封存工作的法律问题分析[J]. *世界科技研究与发展*, 2007, 29(6): 78-83. [Qu Jiansheng, Zeng Jingjing. Carbon dioxide capture and storage: technology, demonstration, and legal aspects——an analysis on the legal related issues of international CCS efforts [J]. *World Sci-tech R & D*, 2007, 29(6): 78-83.]
- 郑晓鹏. 海上天然气田伴生CO₂的海上捕集及回注技术[J]. *中国造船*, 2007, 48(增刊): 297-302. [Zheng Xiaopeng. Study on offshore associated CO₂ capture and injection technology [J]. *Shipbuilding of China*, 2007, 48(Suppl.): 297-302.]
- 张鸿翔,李小春,魏宁. 二氧化碳捕获与封存的主要技术环节与问题分析[J]. *地球科学进展*, 2010, 25(3): 335-340. [Zhang Hongxiang, Li Xiaochun, Wei Ning. The major technology track and analysis about carbon dioxide capture and storage [J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(3): 335-340.]
- 张卫东,张栋,田克忠. 碳捕集与封存技术的现状与未来[J]. *中外能源*, 2009, 14(11): 7-14. [Zhang Weidong, Zhang Dong, Tian Kezhong. Carbon capture and sequestration technology [J]. *Sino-Global Energy*, 2009, 14(11): 7-14.]
- Roser B P, Korsch R J. Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data [J]. *Chemical Geology*, 1988, 67(1/2): 119-139.
- 董林森,刘立,曲希玉,等. CO₂矿物捕获能力的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2010, 25(9): 941-949. [Dong Linsen, Liu Li, Qu Xiyu, et al. Research progress of ability of mineral trapping of CO₂ [J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(9): 941-949.]
- Pettijohn F J. *Sedimentary Rocks* [M]. New York: Harper & Row, 1957: 224-242.
- Bock B, McLennan S M, Hanson G N. Geochemistry and provenance of the Middle Ordovician Austin Glen Member (Normanskill Formation) and the Taconian Orogeny in New England [J]. *Sedimentology*, 1998, 45(4): 635-655.
- Haskin L A, Haskin M A, Frey F A, et al. Relative and absolute terrestrial abundances of the rare earths [M] // Ahrens L H. *Origin and Distribution of the Elements*. Oxford: Pergamon, 1968: 889-911.
- 王清晨,从柏林. 大别山超高压变质岩的地球动力学意义[J]. *中国科学(D辑):地球科学*, 1996, 26(3): 271-276. [Wang Qingchen, Cong Bolin. Geodynamic significance of ultrahigh pressure metamorphic rocks of Dabie Mountain [J]. *Science China (Seri. D): Earth Sciences*, 1996, 26(3): 271-276.]
- 赵振华. *微量元素地球化学原理* [M]. 北京:科学出版社, 1997:

- 199-204.[Zhao Zhenhua. Principle of Trace Element Geochemistry [M]. Beijing: Science Press, 1997: 199-204.]
- 23 张英利,王宗起,闫臻,等. 库鲁克塔格地区新元古代贝义西组的构造环境:来自碎屑岩地球化学的证据[J]. 岩石学报,2011,27(6):1785-1796.[Zhang Yingli, Wang Zongqi, Yan Zhen, et al. Tectonic setting of Neoproterozoic Beiyixi Formation in Quruqtagh area, Xinjiang: Evidence from geochemistry of clastic rocks [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(6): 1785-1796.]
- 24 毛光周,刘池洋. 地球化学在物源及沉积背景分析中的应用[J]. 地球科学与环境学报,2011,33(4):337-348.[Mao Guangzhou, Liu Chiyang. Application of geochemistry in provenance and depositional setting analysis [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2011, 33(4): 337-348.]
- 25 童胜琪,刘志飞,Phon Le K,等. 红河盆地的化学风化作用:主要和微量元素地球化学记录[J]. 矿物岩石地球化学通报,2006,25(3):219-225.[Tong Shengqi, Liu Zhifei, Phon Le K, et al. Chemical weathering in the Red River Basin: records of major and trace elemental geochemistry [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2006, 25(3): 219-225.]
- 26 张鑫,张金亮. 东营凹陷南坡沙河街组四段砂岩地球化学特征[J]. 地质科学,2007,42(2):303-318.[Zhang Xin, Zhang Jinliang. Sedimento-geochemical features of sandstones from the fourth member, Shahejie Formation in the southern slope of Dongying sag [J]. Chinese Journal of Geology, 2007, 42(2): 303-318.]
- 27 Bachu S. Sequestration of CO₂ in geological media: criteria and approach for site selection in response to climate change [J]. Energy Conversion and Management, 2000, 41(9): 953-970.
- 28 高玉巧,刘立,曲希玉. CO₂与砂岩相互作用机理与形成的自生矿物组合[J]. 新疆石油地质,2007,28(5):579-584.[Gao Yuqiao, Liu Li, Qu Xiyu. Mechanism of CO₂-sandstone interaction and authigenic mineral assemblage [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2007, 28(5): 579-584.]
- 29 Berg A, Banwart S A. Carbon dioxide mediated dissolution of Ca-feldspar: implications for silicate weathering [J]. Chemical Geology, 2000, 163(1/2/3/4): 25-42.
- 30 Xu Tianfu, Apps J A, Pruess K. Mineral sequestration of carbon dioxide in a sandstone - shale system [J]. Chemical Geology, 2005, 217(3/4): 295-318.
- 31 Gunter W D, Perkins E H, McCann T J. Aquifer disposal of CO₂-rich gases: Reaction design for added capacity [J]. Energy Conversion and Management, 1993, 34(9/10/11): 941-948.
- 32 黄可可,黄思静,佟宏鹏,等. 长石溶解过程的热力学计算及其在碎屑岩储层研究中的意义[J]. 地质通报,2009,28(4):474-482.[Huang Keke, Huang Sijing, Tong Hongpeng, et al. The thermodynamic calculations of feldspar dissolution and significance of the study of clastic reservoirs [J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28(4): 474-482.]
- 33 高玉巧,刘立,杨会东,等. 松辽盆地孤店二氧化碳气田片钠铝石的特征及成因[J]. 石油学报,2007,28(4):62-67.[Gao Yuqiao, Liu Li, Yang Huidong, et al. Characteristics and origin of dawsonite in Gudian carbon dioxide gas field of Songliao Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 28(4): 62-67.]
- 34 刘立,高玉巧,曲希玉,等. 海拉尔盆地乌尔逊凹陷无机CO₂气储层的岩石学与碳氧同位素特征[J]. 岩石学报,2006,22(8):2229-2236.[Liu Li, Gao Yuqiao, Qu Xiyu, et al. Petrology and carbon oxygen isotope of inorganic CO₂ gas reservoir in Wuerxun depression, Hailaer Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(8): 2229-2236.]
- 35 高玉巧,刘立. 海拉尔盆地乌尔逊凹陷无机CO₂与油气充注的时间记录[J]. 沉积学报,2007,25(4):574-582.[Gao Yuqiao, Liu Li. Time recording of inorganic CO₂ and petroleum infilling in Wuerxun depression, Hailaer Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(4): 574-582.]
- 36 赵爽,杜江峰,刘立,等. 东海盆地丽水凹陷古新统明月峰组含片钠铝石砂岩的自生矿物特征与成岩共生序列[J]. 矿物岩石,2013,33(2):85-93.[Zhao Shuang, Du Jiangfeng, Liu Li, et al. Characteristics of authigenic minerals and paragenetic sequence of dawsonite-bearing sandstones from the Mingyuefeng Formation of Paleocene in Lishui Sag, East China Sea Basin [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2013, 33(2): 85-93.]
- 37 Baker J C, Bai G P, Hamilton P J, et al. Continental-scale magmatic carbon dioxide seepage recorded by dawsonite in the Bowen-Gunndah-Sydney Basin System, Eastern Australia [J]. Journal of Sedimentary Research, 1995, 65(3): 522-530.

Carbon Sequestration Potential of Yanchang Formation Sandstone of JX Well, Ordos Basin

MING XiaoRan¹ LIU Li¹ LIU NaNa¹ SONG TuShun¹ WANG FuGang² YU YanLong¹

(1. College of Earth Sciences of Jilin University, Changchun 130061;

2. College of Environment and Resources of Jilin University, Changchun 130021)

Abstract: There are still some controversies surrounding the security of mudstone upon injection layer of CO₂ injection project that implemented by Shenhua Group in the potential target area of CO₂ underground embedded, Ordos Basin. Forecast the ability of adjourned carbon sequestration after CO₂ penetrate cap rock by research of JX well Yanchang Formation (upon injection layer) that adjacent to injection well of Shenhua Group that the drilling stratigraphic system and rock assemblage are same. The samples of researching layer are mainly feldspar sandstone and lithic feldspar sandstone, followed by lithic sandstone and lithic quartz sandstone, and the rock types of provenance are mainly felsic volcanic rocks, followed by intermediate volcanic rocks and a small amount of quartz sedimentary rock, with compositional characteristics of neutral anorthosite at the same time. The parent rocks of sandstone of the upper section (466~534 m) and lower section (666~958 m) suffered weak-medium chemical alteration, maybe they experienced recycling process, but the parent rocks of sandstone in the middle section (534~666 m) did not suffer from chemical alteration and they are likely the first cycle sediment. As the place of adjourned carbon sequestration, Yanchang Formation has the material conditions of achieving CO₂ mineral traps and potential of forming dawsonite, calcite, ankerite and siderite which called sequestration mineral.

Key words: Erdos Basin; Yanchang Formation; petrology; geochemistry; carbon sequestration potential