

文章编号: 1000-0550(2010) 03-0572-07

火山碎屑岩对 CO₂ 的矿物捕获能力^①

董林森¹ 刘立¹ 张革² 曲希玉¹

(1. 吉林大学地球科学学院 长春 130061; 2 大庆油田研究院 黑龙江大庆 163000)

摘要 CO₂ 矿物捕获是指将大气中排放的 CO₂ 气注入到地下深部的含水层、油气田等渗透性储层中, 通过一系列物理、化学反应, 最终将 CO₂ 气以碳酸盐矿物的形式“固结”在岩石中。火山碎屑岩具有铁、镁离子含量高且容易释放及分布广泛等特点, 是有前途的矿物捕获岩石类型。塔木察格盆地塔南凹陷铜钵庙组火山碎屑岩中发育大量的片钠铝石特征矿物, 进一步证实了火山碎屑岩的矿物捕获能力。在火山碎屑岩中, CO₂ 注入之后形成的矿物有片钠铝石、铁方解石、铁白云石等碳酸盐矿物, 碳酸盐总量高达 30%, 说明 CO₂ 矿物捕获的能力较大。

关键字 片钠铝石 火山碎屑岩 矿物捕获 塔南凹陷

第一作者简介 董林森 女 1983 年出生 博士研究生 沉积地质学 E-mail: jilindonglinsen@yahoo.com.cn

中图分类号 P588.21 **文献标识码** A

0 引言

工业排放的 CO₂ 引起的温室效应是全球气候变暖因素之一^[1,2], CO₂ 地质埋存是减缓全球气候变暖的主要途径^[3,4], CO₂ 地质埋存的目的层主要为不能开采的煤层、枯竭的油气藏和深部的盐水层^[5-7], 深部盐水层可以水动力捕获、溶解捕获和矿物捕获的形式捕获 CO₂^[3,8], 矿物捕获是 CO₂ 溶于地下水后通过水-岩相互作用, 最终将“碳”以碳酸盐矿物的形式“固结”起来的 CO₂ 捕获机制。近年来通过地质观察、实验室实验以及地球化学模拟, 人们已初步揭示了砂岩^[4,6,8-11] 以及玄武岩^[12-15] 对 CO₂ 的矿物捕获机制以及捕获能力。岩石对 CO₂ 的矿物捕获的实质是, 岩石中析出的金属阳离子与 CO₂ 溶于水形成的碳酸离子反应形成碳酸盐矿物。因此, 含有金属阳离子造岩矿物越多的岩石以矿物形式捕获 CO₂ 的潜力就越大。就此而言, 玄武岩等富铁、镁质岩石以矿物形式捕获 CO₂ 的潜力远大于砂岩。由于玄武岩等富铁、镁质岩石的分布远不如砂岩广泛, 因此, 在 CO₂ 地质埋存的选址中, 人们往往把含水的砂岩层确定为埋存的目的层。实际上, 火山碎屑岩也可以作为 CO₂ 地质埋存的目标储层。首先, 随着油气勘探的进展, 火山碎屑岩储层已成为油气勘探的新领域。国内在火山碎屑岩中发现油气藏的盆地包括海拉尔盆地^[16]、酒泉盆地^[17]、鄂尔多斯盆地^[18] 和准噶尔盆地西北缘^[19]

等。国外以火山碎屑岩为储层的油气藏极为常见, 其中, 日本、印度尼西亚、古巴、阿根廷、美国、格鲁吉亚和加纳等国家的火山碎屑岩型油气藏发现的较早。这些油气藏枯竭后, 都可作为 CO₂ 地质埋存的场所。其次, 火山碎屑岩储层一般以低孔低渗、膨胀性粘土矿物含量高为特征, 油气开采难度相对较大。CO₂ 驱油技术可以解决低渗油藏的油气开采问题。而这种将 CO₂ 注入油气藏提高采收率与 CO₂ 地质埋存相结合^[20] 的技术思路, 被认为是温室气体减排的现实选择^[21]。第三, 最近在海拉尔盆地贝尔凹陷的火山碎屑岩中识别出了指示 CO₂ 活动的片钠铝石^[22,23], 这说明火山碎屑岩对 CO₂ 具有“矿物捕获”能力, 是 CO₂ 永久、安全地质埋存的理想储层。本文在归纳、总结火山碎屑岩对 CO₂ 的矿物捕获潜力的基础上, 结合地质实例阐述了天然 CO₂ 注入后形成的“固碳”自生矿物组合。

1 火山碎屑岩对 CO₂ 的矿物捕获潜力

1.1 火山碎屑岩中的金属元素含量及其析出特征

火山碎屑岩系由火山爆发所产生的同期火山碎屑物质, 经空气或水介质的搬运、堆积、固结而成的岩石。其中凝灰岩具有相似于同类火成岩的化学成分^[24], 例如, 在 Al₂O₃、Fe₂O₃、MgO 和 CaO 含量上, 玄武质凝灰岩和安山质凝灰岩高于流纹质凝灰岩^[24], 也高于长石砂岩^[24]。金属元素主要赋存于玄武岩岩

①教育部博士点基金项目(编号: 20070183137和 20090061120043)、国家自然科学基金项目(批准号: 40972075、40672074和 40372060)资助。
收稿日期: 2009-05-30 收修改稿日期: 2009-06-27

屑、安山岩岩屑以及相应成分的隐晶质岩屑和长石、黑云母及角闪石等晶屑中。

火山碎屑岩易于蚀变, 从而引起金属元素的重新分配与析出。例如玄武质凝灰岩蚀变为次生氧化硅、沸石类、碳酸盐、绿泥石类以及褐铁矿^[24]。富含长石的凝灰岩易于高岭石化, 而火山灰层易于形成高岭岩和斑脱岩。是形成高岭岩还是斑脱岩取决于沉积环境和介质地球化学条件。当火山灰落进泥炭沼泽环境, 因水介质 pH 低, 含碱金属和碱土元素的矿物和火山玻璃水解, 析出 K、Na、Ca、Mg 和部分 SO₂, 直接形成高岭岩。当火山灰落进碱性介质环境或海水中, 含碱金属和碱土元素的矿物和火山玻璃水解不充分, 则形成由蒙皂石和伊利石构成的岩层, 例如四川三叠系中的“绿豆岩”^[25]。凝灰质砂岩中的凝灰质填隙物可以蚀变成高岭石。例如, 在鄂尔多斯盆地西北部二叠系凝灰质砂岩中, 粒间凝灰质残余物与“脏”高岭石团块间具有相互过渡及渐变关系, 其形成是由于凝灰质填隙物析出 K、Na、Ca、Mg 和 Fe 等较活性元素, 并且富集硅、铝的结果^[18]。

实验表明, 火山碎屑岩在酸性介质中易于溶解和析出金属离子。王建伟等^[18]为了了解凝灰质填隙物的可溶蚀性能, 在实验室开展了地层水对凝灰质填隙物的溶解实验。连续实验时间约 25 d 计 600 h 实验温度为 88 ± 2℃。25% 浓度乙酸溶液中溶出量为 0.2% ~ 4.6%, 5% 浓度乙酸溶液中溶出量 0.1% ~ 3.6%。溶蚀实验前, 电镜下显示出凝灰质填隙物中酸性不稳定条片状矿物大量存在, 蚀变后仅可以观察到硅质颗粒。由于火山碎屑岩中既含有各种火山岩屑, 又含有长石等晶屑。因此, 火山岩和长石等与 CO₂ 流体的相互作用实验均可用来了解火山碎屑岩在酸性介质中的溶解和金属离子析出情况。研究表明, 富 CO₂ 水与玄武岩反应释放出的 Mg 和 Ca 的通量比其他结晶岩或富硅岩石高两个数量级^[26]。

由于火山碎屑物质易于蚀变, 火山碎屑岩往往成为油气的优质储层。例如, 酒泉盆地油田下白垩统下沟组凝灰质碳酸盐岩和凝灰质砂砾岩储层, 由于凝灰质的存在不但改善了储集空间, 而且有利于各种裂缝的形成^[17]。

1.2 富 CO₂ 流体—火山碎屑岩相互作用形成的碳酸盐矿物

火山碎屑岩容易碳酸盐化, 地质观察表明, 在青海省满丈岗地区见碳酸盐化晶屑凝灰岩^[27], 在海拉尔盆地贝尔凹陷南屯组的火山碎屑岩中发育泥晶碳

酸盐矿物、白云石、铁方解石和铁白云石等碳酸盐矿物^[28], 孙彦达等^[22]在海拉尔盆地火山碎屑岩油气储层中还发现 CO₂ 运移、聚集活动的片钠铝石特征矿物, 此外也发现了泥晶碳酸盐矿物、含铁方解石和白云石等碳酸盐矿物, 其中火山碎屑岩的岩石类型主要为凝灰岩及凝灰质砂岩。刘立等^[23]对蒙古国塔木察格盆地塔南凹陷和海拉尔盆地贝尔凹陷的含片钠铝石火山碎屑岩岩石类型研究表明, 片钠铝石分布于熔结凝灰岩 (占 50%)、凝灰岩 (18.8%)、凝灰质砂岩 (18.8%) 以及沉凝灰岩 (12.5%) 中, 这说明火山碎屑岩是很好的 CO₂ 矿物捕获的岩石类型。

火山碎屑岩中含有大量的长石及火山岩屑, 而以往关于砂岩及火山岩的研究也表明, CO₂ 流体与长石等铝硅酸盐矿物反应生成片钠铝石^[4]、方解石等^[29], 玄武岩等火山岩能够与富 CO₂ 流体反应生成碳酸盐矿物, 地球化学模拟的研究结果表明, CO₂ 可以与玄武岩反应生成方解石^[30]、菱铁矿^[31]、白云石^[30, 31]、片钠铝石^[31]和菱镁矿^[31]等碳酸盐矿物, 黑云母^[4]和角闪石^[32]等也能与富 CO₂ 流体反应形成碳酸盐矿物, 此外, 粘土矿物在相互转化的过程中能够释放阳离子, 从而与富 CO₂ 流体反应形成碳酸盐矿物, 例如蒙脱石向伊利石的转化能够为铁白云石提供铁镁离子^[33], 综上, 说明火山碎屑岩中的长石以及岩屑和粘土矿物等都能够与 CO₂ 反应形成碳酸盐矿物。

2 含片钠铝石火山碎屑岩的岩石学特征研究实例

塔木察格盆地位于蒙古国东部, 向北延伸进入中国, 与海拉尔盆地属于同一沉积盆地, 盆地面积 35 400 km², 塔南凹陷是塔木察格盆地的一个二级构造单元, 地层自下而上划分为侏罗系下统布达特群和兴安岭群、白垩系下统铜钵庙组、南屯组、大磨拐河组和伊敏组、青元岗组, 其中在铜钵庙组的火山碎屑岩中发现大量的片钠铝石。样品采自塔 19-48 井 1 968.1 ~ 1 985.67 m, 采集了含片钠铝石火山碎屑岩岩心样品 61 件, 切割 80 片薄片。利用 OLYMPUS 偏光显微镜对研究区含片钠铝石的 30 片普通薄片进行了镜下识别与统计, 识别出含片钠铝石砂岩中的胶结物与自生矿物类型, 对其中 19 片不加盖玻璃的薄片进行了茜素红-S 染色, 以区分碳酸盐矿物。对 24 件火山碎屑岩样品中粘土进行了 X 射线衍射分析, X 射线衍射分析是在大庆油田研究院测试中心, 利用 D/max-2500 型号 X 射线衍射仪测试的。18 样品进行了扫

描电镜分析,测试单位为大庆油田研究院,测试的设备为日本 JEOL 公司 JSM 6700F 场发射电镜。

2.1 岩石类型

研究区含片钠铝石火山碎屑岩包括凝灰岩、沉凝灰岩和凝灰质砂岩,主要由晶屑、玻屑和岩屑所组成。晶屑含量约 15% ~ 30%, 主要包括石英、长石和黑云母,其中长石占 13% ~ 25%, 石英占 2% ~ 5%, 黑云母少量。岩屑含量约 20% ~ 80%, 有两种,一种为次圆状熔岩碎屑,为陆源岩屑,约占 5% ~ 35%, 另一种为不规则粒状的塑性岩屑,约占 15% ~ 45%。塑性玻屑含量约 20% ~ 60%。

表 1 塔 19-48 井含片钠铝石火山碎屑岩中粘土 X 射线衍射分析数据

Table 1 Data of X-ray diffraction analysis for the dawsonite-bearing pyroclastic rock

编号	埋深 /m	岩性	粘土矿物相对含量 /%			混层比 /%	
			I	K	I/S	I/S	
1	1968 1	沉凝灰岩	28	16	56	30	
2	1968 6	沉凝灰岩	25	42	33	30	
3	1969 32	沉凝灰岩	21	39	40	30	
4	1970 23	沉凝灰岩	21	33	46	0	
5	1971 22	沉凝灰岩	35	15	50	30	
6	1971 46	凝灰质砂岩	36	20	44	30	
7	1971 89	凝灰质砂岩	29	54	17	30	
8	1972 23	凝灰质砂岩	27	39	34	30	
9	1973 95	沉凝灰岩	26	17	57	30	
10	1975 07	沉凝灰岩	21	22	57	30	
11	1975 56	沉凝灰岩	22	23	55	30	
12	1975 82	沉凝灰岩	13	26	61	0	
13	1976 5	沉凝灰岩	13	35	52	0	
14	1977 58	沉凝灰岩	22	14	64	30	
15	1978 74	沉凝灰岩	19	32	49	0	
15	1979 3	沉凝灰岩	14	25	61	0	
17	1979 92	沉凝灰岩	28	32	40	30	
18	1980 87	凝灰质砂岩	14	17	69	30	
19	1981 13	沉凝灰岩	15	24	61	30	
20	1981 54	沉凝灰岩	18	15	67	0	
21	1982 03	凝灰质砂岩	17	29	54	0	
22	1982 75	凝灰质砂岩	22	40	38	0	
23	1983 37	沉凝灰岩	19	13	68	30	
24	1983 84	沉凝灰岩	23	10	67	0	

注: I/S 为伊蒙混层, I 为伊利石, K 为高岭石

2.2 成岩共生序列

含片钠铝石火山碎屑中的胶结物与自生矿物主要为自生石英、片钠铝石、方解石、铁方解石、铁白云石和自生粘土矿物。火山碎屑岩样品 X 射线衍射分析数据表明(表 1), 火山碎屑岩中的自生粘土矿物包

括伊蒙混层、自生伊利石和自生高岭石, 粘土矿物首先是以蒙皂石和伊利石的形式贴附于颗粒表面并沿碎屑颗粒边缘呈环绕状分布, 以碎屑颗粒包壳形式产出, 随着温度升高与成岩环境的改变, 粘土矿物包壳中的蒙皂石包壳逐渐分解形成伊蒙混层, 伊蒙混层粘土矿物相对含量高达 69%, 高岭石相对含量为 15% ~ 54%, 伊利石含量为 13% ~ 36%。根据未在方解石、自生石英、自生高岭石、片钠铝石、铁方解石和铁白云石充填后剩余的孔隙中发现伊蒙混层和伊利石的事实, 认为粘土矿物包壳是含片钠铝石砂岩中最早形成的自生矿物。

方解石, 茜素红-S 染色呈粉红色, 多充填孔隙(图版 I -a), 含量高达 14%, 颗粒与颗粒之间多以不接触或点接触为主, 压实作用较弱, 说明方解石形成较早, 增强了火山碎屑岩的抗压实能力, 又方解石充填在粘土包壳形成后剩余孔隙内, 而且在方解石内未见除粘土矿物包壳之外的自生矿物, 说明方解石的形成晚于粘土包壳早于其它自生矿物。普通薄片下, 见自生石英围绕碎屑颗粒边部以包壳形式产出(图版 I -b), 包壳厚度约 0.01mm, 含量在 0 ~ 4% 左右。在扫描电镜下可见到自生石英具有完好的六方双锥晶体及晶簇, 并与高岭石共生, 充填在孔隙中(图版 I -c), 未见石英次生加大现象。由于酸性流体进入储层后, 会导致早期形成的碳酸盐胶结物和长石等不稳定组分溶蚀, 形成高岭石和自生石英的成岩矿物组合, 可以推断长石溶蚀溶解、高岭石和自生石英为同一酸性流体环境的产物, 其形成应是准同时的。片钠铝石一般以束状、杂乱毛发状和板状等集合体形式交代长石、石英、岩屑及火山物质, 当交代完全时往往呈上述碎屑颗粒的假相(图版 I -d), 此外还见少量片钠铝石以放射状、杂乱毛发状和板状充填孔隙(图版 I -e), 呈放射状产出者的核心为密集的微晶片钠铝石集合体, 呈团簇状, 向末端过渡为放射状集合体, 晶体最大宽度在 0.02 ~ 0.06 mm 之间, 含量大都在 10% ~ 23% 之间, 片钠铝石充填在微晶石英包壳形成后剩余的孔隙里, 可以判断片钠铝石的形成在自生石英和高岭石之后。含铁方解石含量较低, 染色后呈淡紫色, 通常铁方解石交代方解石是从边缘向内部进行, 从颗粒边部向中心, 颜色逐渐由淡紫色—紫红色—粉红色变化, 说明铁质含量逐渐降低, 见铁方解石交代片钠铝石(图版 I -f), 可以判定铁方解石在片钠铝石之后形成。铁白云石的化学式是 $\text{Ca}(\text{Fe Mg})(\text{CO}_3)_2$, 茜素红-S 染色后呈蓝色, 在研究区火山碎屑

岩中大量发育, 高达 13%, 铁白云石自形程度较好, 常常交代长石 (图版 I -g)、岩屑等, 见铁白云石生长在长石的解理缝中, 也交代片钠铝石等胶结物 (图版 I -f g), 或见孔隙中充填的铁白云石 (图版 I -h), 铁白云石沿铁方解石的边部交代铁方解石 (图 1f), 此外铁白云石边缘未发现任何其他胶结物和自生矿物, 说明铁白云石最晚形成。根据以上各成岩现象不难看出研究区的成岩共生序列为: 粘土包壳—方解石—长石溶解、微晶石英、高岭石—片钠铝石—铁方解石—铁白云石。

2.3 在 CO₂ 注入之后形成的碳酸盐矿物

地质观察表明, 片钠铝石往往是在高 CO₂ 分压条件下形成的, 例如渤海湾盆地胜利油田^[34]、苏北盆地金湖凹陷^[35]所发现的片钠铝石大多与 CO₂ 气藏的分布一致。徐衍彬等^[36]的研究认为, 海拉尔盆地乌尔逊凹陷的片钠铝石的形成与 CO₂ 的分压有关, 含有片钠铝石的井均分布在 CO₂ 分压的高值区。Bader^[37]在过量 CO₂ 存在的情况下, 利用过钠铝酸盐和碳酸钠溶液合成了片钠铝石, 此外, 地球化学数值模拟也表明片钠铝石是在高 CO₂ 分压条件下形成的^[8, 10, 11], 综合以上, 可以确定片钠铝石是 CO₂ 的示踪矿物。

鉴于片钠铝石是 CO₂ 的示踪矿物, 可以用片钠铝石为标志划分 CO₂ 的注入时间, 在 CO₂ 注入之前形成的自生矿物包括粘土包壳、方解石、微晶石英和高岭石, 注入之后的自生矿物有片钠铝石、铁方解石和铁白云石, Xu 等^[8]的地球化学模拟表明片钠铝石和铁白云石都是 CO₂ 高压条件下的产物, 而铁方解石是在片钠铝石和铁白云石之间形成的, 可以推断铁方解石的形成也与 CO₂ 注入有关。

在塔 19-48 井的火山碎屑岩中捕获 CO₂ 的矿物有片钠铝石、铁白云石和铁方解石, 片钠铝石的含量多在 12% ~ 23% 之间 (表 2), 仅有一例小于 10%, 铁白云石的含量在 1% ~ 13% 之间, 铁方解石的含量相对较少, 这三种矿物的总的含量高达 30%, 这说明火山碎屑岩的矿物捕获潜力是巨大的。

3 结论

(1) 火山碎屑岩中含有大量的铁镁离子, 较容易释放, 且容易形成碳酸盐矿物, 是 CO₂ 矿物捕获的良好岩石类型。

(2) 塔南凹陷含片钠铝石火山碎屑岩中的自生矿物包括自生石英、片钠铝石、方解石、铁方解石、铁白云石及自生粘土矿物, 成岩共生序列为粘土包壳—

方解石—酸性流体注入—长石溶解、微晶石英、高岭石—CO₂ 流体注入—片钠铝石—铁方解石—铁白云石。

表 2 塔 19-48 井含片钠铝石火山碎屑岩中天然 CO₂ 注入后形成的碳酸盐矿物的含量

Table 2 The content of carbonate after the injection of CO₂ for the dawsonite-bearing pyroclastic rock

编号	埋深 /m	岩石类型	片钠铝石	铁方解石	铁白云石
1	1968 32	凝灰质砂岩	2	0	11
2	1969 13	凝灰质砂岩	12	1	13
3	1970 30	沉凝灰岩	16	1	2
4	1971 20	凝灰岩	14	0	2
5	1972 33	沉凝灰岩	23	1	7
6	1972 90	凝灰岩	16	0	1
7	1973 65	凝灰岩	15	0	2
8	1974 70	凝灰岩	15	0	3
9	1975 90	凝灰岩	18	1	8
10	1976 50	凝灰岩	17	0	3
11	1977 30	凝灰岩	22	1	3
12	1978 55	凝灰岩	18	2	3
13	1979 95	沉凝灰岩	19	0	1
14	1980 60	凝灰岩	15	0	1
15	1981 80	凝灰岩	12	0	3
16	1982 53	沉凝灰岩	17	0	2
17	1983 62	凝灰岩	17	0	2
18	1984 36	凝灰岩	15	0	1
19	1986 00	凝灰岩	14	1	5

(3) 片钠铝石是 CO₂ 的示踪矿物, 在 CO₂ 注入之后形成的碳酸盐矿物有片钠铝石、铁方解石和铁白云石, 含量高达 30%, 这说明火山碎屑岩的矿物捕获潜力是巨大的。

参考文献 (References)

- Marchetti C. On geoengineering and the CO₂ problem [J]. Climate Change 1977, 1: 59-68
- 孙枢. CO₂ 地下封存的地学问题及其对减缓气候变化的意义 [J]. 中国基础科学, 2008 (3): 17-22 [Sun Shu. Geological problems of CO₂ underground storage and its significance on mitigating climate change [J]. China Basic Science, 2008 (3): 17-22]
- Hitchon B. ed. Aquifer Disposal of Carbon Dioxide [M]. Alberta Canada Geoscience Publishing Ltd. Sherwood Park, 1996
- Zerai B, Saylor B Z, Matisoff G. Computer simulation of CO₂ trapped through mineral precipitation in the Rose Run Sandstone, Ohio [J]. Applied Geochemistry, 2006, 21: 223-240
- Bachu S. Sequestration of CO₂ in geological media in response to climate change: road map for site selection using the transform of the geological space into the CO₂ phase space [J]. Energy Conversion and Management, 2002, 43: 87-102

- 6 Xu T, Apps JA, Pruess K. Numerical simulation to study mineral trapping for CO₂ disposal in deep aquifers [J]. *Applied Geochemistry*, 2004, 19: 917-936
- 7 江怀友, 沈平平, 李相方, 等. 世界地质储层二氧化碳埋存量评价技术研究 [J]. *中外能源*, 2008, 13(2): 93-99 [Jiang Huaiyou, Shen Pingping, Li Xiangfang *et al.* Study in to technologies for estimating theoretical volume of CO₂ stored underground worldwide [J]. *Sino-Globa Energy*, 2008, 13(2): 93-99]
- 8 Xu T, Sonnenthal E, Spycher N, *et al.* Toughreact-A simulation program for non-isothermal multiphase reactive geochemical transport in variably saturated geologic media: applications to geothermal injectivity and CO₂ geological sequestration [J]. *Computers & Geosciences*, 2006, 32: 145-165
- 9 Xu T, Apps JA, Pruess K. Mineral sequestration of carbon dioxide in a sandstone-shale system [J]. *Chemical Geology*, 2005, 217: 295-318
- 10 Moore J, Adams M, Allis R, *et al.* Mineralogical and geochemical consequences of the long-term presence of CO₂ in natural reservoirs: an example from the Springer-ville-St. Johns Field, Arizona, and New Mexico, USA [J]. *Chemical Geology*, 2005, 217: 365-385
- 11 Worden RH. Dawsonite cement in the Triassic Lan Formation, Shallowa Basin, Yemen: A natural analogue for a potential mineral product of subsurface CO₂ storage for greenhouse gas reduction [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2006, 23: 61-77
- 12 Koljonen T, Sikavirta H, Zevenhoven R, *et al.* CO₂ capture, storage and reuse potential in Finland [J]. *Energy*, 2004, 29: 1521-1527
- 13 Metz B, Davidson O, de Coninck H C, *et al.* Special report on carbon dioxide capture and storage [C]// Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2005
- 14 Oelkers EH, Cole DR. Carbon dioxide sequestration: a solution to a global problem [J]. *Elements*, 2008, 4: 305-310
- 15 Teir S, Elneva S, Fogelholm C J, *et al.* Fixation of carbon dioxide by producing hydromagnesite from serpentinite [J]. *Applied Energy*, 2009, (86): 214-218
- 16 冯志强, 任延广, 张晓东, 等. 海拉尔盆地油气分布规律及下步勘探方向 [J]. *中国石油勘探*, 2004, 9(4): 19-22 [Feng Zhiqiang, Ren Yanguang, Zhang Xiaodong, *et al.* Law of oil and gas distribution in Hailar Basin and orientation for exploration at next stage [J]. *China Petroleum Exploration*, 2004, 9(4): 19-22]
- 17 李军, 王德发, 范洪军. 甘肃酒泉盆地青西油田裂缝特征及成因分析 [J]. *现代地质*, 2007, 21(4): 691-696 [Li Jun, Wang Defa, Fan Hongjun. A description of fracture features and its formation mechanism in Qingxi Oilfield, Jiuquan Basin, Gansu [J]. *Geoscience*, 2007, 21(4): 691-696]
- 18 王建伟, 鲍志东, 陈孟晋, 等. 砂岩中的凝灰质填隙物分异特征及其对油气储集空间影响——以鄂尔多斯盆地西北部二叠系为例 [J]. *地质科学*, 2005, 40(3): 429-438 [Wang Jianwei, Bao Zhi-dong, Chen Mengjin, *et al.* Differentiation of sandstones' tuff fillings and its effect on porosity: An example from the Paleozoic sandstones in northwestern Ordos [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2005, 40(3): 429-438]
- 19 吴运强, 常秋生, 蒋宜勤, 等. 气孔状火山碎屑岩储集层成因特征及油气勘探意义 [J]. *新疆石油地质*, 2006, 27(4): 166-168 [Wu Yunqiang, Chang Qiusheng, Jiang Yiqin, *et al.* Genetic characteristics of vesicular volcaniclastic reservoir of Fengcheng Formation in Wellblock Xi-72 and its significance for hydrocarbon exploration [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2006, 27(4): 166-168]
- 20 沈平平, 杨永智. 温室气体在石油开采中资源化利用的科学问题 [J]. *中国基础科学*, 2006, 3: 23-31 [Sheng Pingping, Yang Yongzhi. Problems on enhanced oil recovery by using greenhouse gas [J]. *China Basic Science*, 2006, 3: 23-31]
- 21 江怀友, 沈平平, 宋新民, 等. 世界气候变暖形势严峻二氧化碳减排工作势在必行 [J]. *中国能源*, 2007, 29(5): 10-15 [Jiang Huaiyou, Shen Pingping, Song Xinmin, *et al.* CO₂ emission mitigation is urgent due to global climate warming severely [J]. *Energy of China*, 2007, 29(5): 10-15]
- 22 孙彦达, 张民志. 海拉尔盆地碳钠铝石特征及其地质意义 [J]. *石油实验地质*, 2006, 28(5): 504-506 [Sun Yanda, Zhang Minzhi. Characteristics of dawsonite and its petroleum geologic significance in the Hailar Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2006, 28(5): 504-506]
- 23 刘立, 曲希玉, 董林森, 等. 东北及邻区中生代盆地片钠铝石的分布、产状及其油气地质意义 [J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2009, 39(1): 1-8 [Liu Li, Qu Xiyu, Dong Linsen, *et al.* Distribution, occurrence and their petroleum significance of dawsonite from Mesozoic basins in northeastern China and adjacent area [J]. *Journal of Jilin University Earth Science Edition*, 2009, 39(1): 1-8]
- 24 Pettijohn F J. *Sedimentary Rocks* [M]. New York: Harper & Row, 1975
- 25 冯宝华. 我国北方石炭—二叠纪火山灰沉积水解改造而成的高岭石 [J]. *沉积学报*, 1989, 7(1): 101-108 [Feng Baohua. Carboniferous-Permian tonsteins formed by hydrolytic reformation of volcanic ash sediments in northern China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1989, 7(1): 101-108]
- 26 Wolff-Boenisch D, Gislason S R, Oelkers E H. The effect of crystallinity on dissolution rates and CO₂ consumption capacity of silicates [J]. *Geochemistry et Cosmochimica Acta*, 2006, 70: 858-870
- 27 郁东良. 青海省满丈岗地区金地球化学特征及找矿方向探索 [J]. *黄金科学技术*, 2008, 16(1): 52-55 [Yu Dongliang. Geochemical characteristics and prospect direction of the gold in Manzhanggang Area of Qinghai Province [J]. *Gold Science and Technology*, 2008, 16(1): 52-55]
- 28 王海燕, 刘立, 高玉巧, 等. 海拉尔盆地贝尔凹陷南屯组火山碎屑岩成岩作用的讨论 [J]. *世界地质*, 2005, 24(3): 219-224 [Wang Haiyan, Liu Li, Gao Yuqiao, *et al.* Discussion of diageneses of volcaniclastic rocks of Nantun Formation in Beiersag, Hailar Basin [J]. *Global Geology*, 2005, 24(3): 219-224]
- 29 Robert J R, Koksak T, Palandri J L, *et al.* Experimental investigation of CO₂ brine rock interactions at elevated temperature and pressure: implications for CO₂ sequestration in deep-saline aquifers [J]. *Fuel Processing Technology*, 2005, (86): 1581-1597
- 30 Flaathen T K, Gislason S R, Oelkers E H, *et al.* Chemical evolution

- of the Mt Hekla Iceland groundwaters: A natural analogue for CO₂ sequestration in basaltic rocks Appl [J]. Applied Geochemistry, 2009, 24: 463-474
- 31 Marini L. Geological Sequestration of Carbon-dioxide: Thermodynamics, Kinetics and Reaction Path Modeling [M]. Elsevier, Amsterdam, 2007: 470
- 32 Golubev S V, Pokrovsky O S, Schott J. Experimental determination of the effects of dissolved CO₂ on the dissolution kinetics of Mg and Ca silicates at 25 °C [J]. Chemical Geology, 2005, 217: 227-238
- 33 Boles J R. Clay diagenesis and effects on sandstone cementation (case histories from the Gulf Coast Tertiary) [C] // Longstaffe F J. Clays and the Resource Geologist. Mineralogical Association of Canada Short Course Handbook, 1981: 1075-1078
- 34 杜韞华. 一种次生的片钠铝石 [J]. 地质科学, 1982, 4: 434-437 [Du Yunhua. Secondary dawsonite in Shengli Oilfield, China [J]. Scientia Geologica Sinica, 1982, 4: 434-437]
- 35 黄善炳. 金湖凹陷阜宁组砂岩中片钠铝石特征及对物性的影响 [J]. 石油勘探与开发, 1996, 23(2): 32-34 [Huang Shanbing. The character of dawsonite in sandstone reservoirs of the Funing Formation in Jintu Sag and its influence on reservoir properties [J]. Petroleum Exploration and Development, 1996, 23(2): 32-34]
- 36 徐衍彬, 陈平, 徐永成. 海拉尔盆地碳钠铝石分布与油气的关系 [J]. 石油与天然气地质, 1994, 15(4): 322-327 [Xu Yanbin, Chen Ping, Xu Yongcheng. Dawsonite distribution and its relationship with oil and gas in Halaer Basin [J]. Oil & Gas Geology, 1994, 15(4): 322-327]
- 37 Bader E. Über die bildung und konstitution des dawsonite und seine synthetische darstellung [J]. Mineralogy, Geology and Palaeontology, 1938, 74: 449-465

The Mineral Trapping of CO₂ for Pyroclastic Rocks

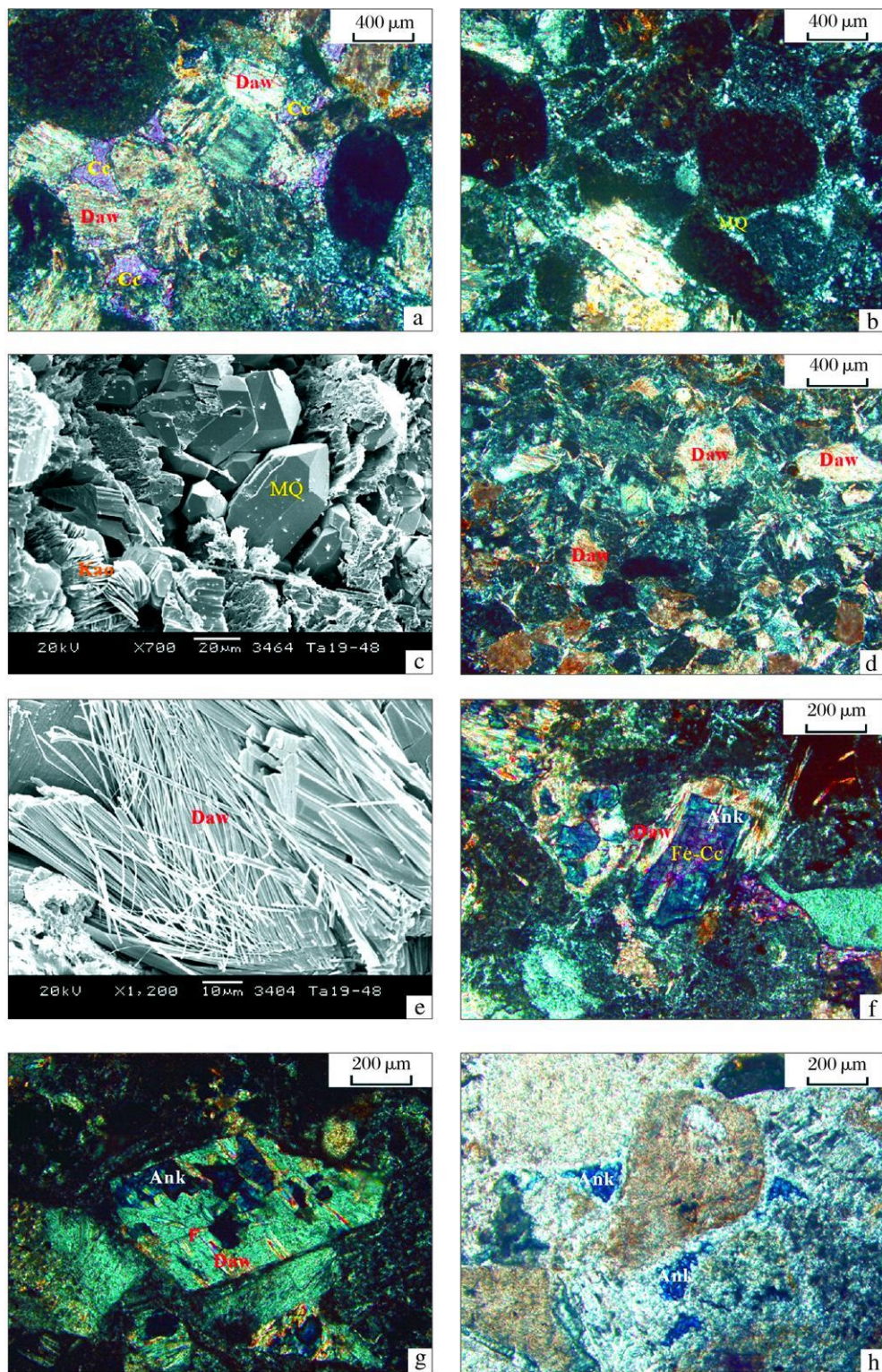
DONG Lin-sen¹ LIU Li¹ ZHANG Ge² QU Xi-yu¹

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

2 Exploration and Development Research Institute PetroChina Daqing Oilfield Company, Daqing Heilongjiang 163000)

Abstract The mineral trapping of CO₂ refers to the atmospheric emissions of CO₂ gas was injected into the formation of deep aquifers, oil and gas fields via a series of physical and chemical reactions. CO₂ gas will eventually be consolidated in the carbonate minerals. Pyroclastic rocks with high content of magnesium ions and easy to be released and a broad distributing can be used as a promising rock type for mineral trapping. Tongbaniao formation of Tanan sag in Tanu chage basin contain abundant dawsonite-bearing volcanoclastic rocks, which further proves the mineral trapping capabilities of pyroclastic rocks. There are three carbonate minerals in pyroclastic rocks after the injection of CO₂, which contain dawsonite, ferrocalcite and ankerite, the total content is up to 30%, which suggests the capacity of CO₂ mineral trapping is large enough.

Key words pyroclastic rocks, dawsonite, mineral trapping, Tanan Sag



图版I 说明: a 方解石充填孔隙, 1 978.55 m, (染色薄片, 正交偏光, 10×10); b 微晶石英包壳, 1 970.3 m, (正交偏光, 10×10); c 高岭石与自生石英充填孔隙, 1 982.75 m, (扫描电镜, $\times 700$); d 片钠铝石交代碎屑颗粒并呈碎屑颗粒假象, 1 972.9 m, (正交偏光, 10×10); e 片钠铝石充填孔隙, 1 975.56 m, (扫描电镜, $\times 1200$); f 铁白云石交代铁方解石、铁方解石和铁白云石交代片钠铝石, 1 972.33 m (染色薄片, 正交偏光, 20×10), 正交偏光; g 铁白云石交代被片钠铝石交代后的长石, 1974.7 m, (染色薄片, 正交偏光, 20×10); h 铁白云石充填孔隙, 1 978.55 m, (染色薄片, 单偏光, 20×10)。Kao-高岭石, Daw-片钠铝石, Ce-方解石, Ank-铁白云石, MQ-微晶石英, Fe-Cc-铁方解石