

文章编号: 0253-9985(2009)05-0662-06

高矿化度地层水中(铝)硅酸盐矿物溶解作用

陈传平¹, 刘建平², 杜卫刚¹

(1. 淮阴工学院 生命科学与化学工程学院, 江苏 淮安 223003; 2. 华中师范大学 化学学院, 湖北 武汉 433000)

摘要: 选取石英和斜长石颗粒, 分别加入不同氯化钠浓度的 0.05 mol/L 乙酸钠溶液进行溶蚀实验, 并测定溶液中几种常见成矿元素的含量。结果表明, 石英颗粒溶液中 SiO_2 含量随氯化钠浓度的增加逐渐降低。由此推测, 石英矿物的溶蚀作用随地层水中矿化度的急剧增加而降低。斜长石颗粒溶液中, 各成矿元素的含量变化比较复杂。对不同电荷数的金属离子, 溶出的程度有较大差异, 并随氯化钠浓度的增加表现出不同的变化趋势。此外, 还讨论了高浓度卤水中无机离子的活度以及离子间的同离子效应、盐效应和阴离子与金属离子的络合作对矿物溶蚀速率的影响。高浓度氯化钠溶液不利于骨架结构的硅氧四面体和铝氧四面体的溶蚀; 同离子效应会降低长石首先溶出碱金属的速度; 但盐效应以及无机阴离子 Cl^- 的络合作用对高价金属离子的溶解有促进作用。

关键词: 同离子效应; 盐效应; 络合作用; 矿物溶解; 矿化度; 地层水

中图分类号: TE133 文献标识码: A

Dissolution of aluminosilicate mineral in high-salinity formation water

Chen Chuanping¹, Liu Jianping², Du Weigang¹(1. School of Life Sciences and Chemical Engineering Huaiyin Institute of Technology, Huai'an, Jiangsu 223003, China;
2. School of Chemistry, Huazhong Normal University, Wuhan Hubei 433000, China)

Abstract: Experimental research on the dissolution of aluminosilicate mineral has been carried out by putting quartz and plagioclase grains in sodium acetate solutions (0.05 mol/L) with different sodium chloride concentrations. The contents of several mineral elements in experimental solutions have been measured. The result indicates that the content of SiO_2 in the solution with quartz grain reduces gradually with the increasing concentration of sodium chloride. It is therefore speculated that the dissolution of quartz reduce rapidly with the increase of salinity of formation water. In contrast, the dissolution of mineral elements in the solution with plagioclase grain is different for metal ions with different electrovalences and shows various changing tendencies with the increasing concentration of sodium chloride in solution. The influences of various factors on dissolution rate, including inorganic ion activity in high-salinity brine and their common-ion effect, salt effect and chelating effect between anion and metal ion have been studied and discussed. It is concluded that high concentration of sodium chloride is not favorable for the dissolution of silicon-oxygen tetrahedron and aluminum-oxygen tetrahedron. The common-ion effect may slow down the preferential dissolution of alkali metal ions. While salt effect and chelating of inorganic anion Cl^- may facilitate the dissolution of metal ions with high electrovalences.

Key words: common-ion effect; salt effect; chelating; dissolution of mineral; salinity; formation water

储集岩性质直接关系到油气的运移和储存。地层水中溶解的许多物质可与围岩发生溶蚀反应。在这些物质中, 低分子量有机酸和 CO_2 及其

阴离子对水的 pH 和 Eh 值起到缓冲作用, 并能与成矿元素形成络合物而促进矿物的溶解^[1-3]。因此, 多年来有机-无机相互作用在储层地球化学研

收稿日期: 2009-05-14

第一作者简介: 陈传平 (1956-) 男, 教授、博士, 化学与地球化学。

基金项目: 国家“八五”重点科技攻关项目 (85-101-1-5)。

究中受到了广泛的关注。相对而言,在较淡化地层水中,无机离子对矿物的溶解作用似乎可以忽略。然而,一旦地层水矿化度增加,水中有些无机离子浓度可达十几万 mg/L,高出有机质丰度一到几个数量级。这些离子对矿物溶解的影响无疑将成为一个重要的因素。

高矿化度地层水在我国有着广泛的分布。尤其是塔里木盆地^[4],其腹地各层系油田水平均矿化度达 18×10^4 mg/L,最高接近 30×10^4 mg/L,为卤水级。其中,某些无机离子单个组分浓度就达十几万 mg/L。而迄今从这些油田水中检测出的有机酸总量大多为几十至几百 mg/L,只有少数达 1 000 mg/L 以上^①。

讨论高矿化度地层水中矿物的溶解与迁移对探索次生孔隙形成机制并预测油气有利分布带都有实际意义^[5]。略感缺憾的是,许多人虽然已经注意到水中无机离子对储集岩性质的影响,但还较少系统地从微观机理和影响程度上开展讨论^[6-7]。为此,笔者试图通过实验,对高矿化度无机离子与矿物之间的作用进行初步分析。

1 实验

选取较纯净的石英和斜长石,粉碎至粒径约

1 mm,用蒸馏水漂洗,以去除表面机械杂质;干燥后备用。

高矿化度地层水中,通常主要阳离子为 Na^+ (化学滴定法中为 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$),主要阴离子为 Cl^- ^[8]。如塔里木轮南地区中等矿化度 (15×10^4 mg/L)地层水中,阳离子 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 浓度为 47 178 mg/L,占总矿化度的 31.5%;阴离子 Cl^- 浓度为 90 198 mg/L,占总矿化度的 60.1%。而地层水中的主要羧酸阴离子为乙酸根^[11]。因此,我们用氯化钠 (NaCl)和乙酸钠 (均为分析纯)加去离子水配制成不同浓度的水溶液作为溶蚀液。溶液配比见表 1。调节各溶液,使其 pH 值为 7。

称取上述经粉碎、漂洗后的矿物颗粒约 30 mg 加入 30 mL 不同浓度的溶蚀液 (表 1),在 120°C ($\pm 1^\circ\text{C}$)下加热 240 h。实验在内衬聚四氟乙烯的不锈钢高压反应釜中进行。另取两个不同矿物颗粒样品,加入去离子水,在同样条件下加热作空白对照组 (表 1 中的 1 号、6 号样品)。实验结束后,过滤分离固体颗粒,对溶液中的常量元素进行含量测定 (因溶液中加入大量乙酸钠和氯化钠, Na^+ 含量未分析)。元素含量测定采用等离子体发射光谱法,由武汉理工大学分析测试中心 (国家质量认证机构) 完成。

表 1 不同 NaCl 浓度的 0.05 mol/L 乙酸钠溶液对矿物溶蚀作用实验结果
Table 1 Experimental results of aluminum silicate dissolution in sodium acetic solutions (0.05 mol/L) with different sodium chloride concentrations

编号	矿物	NaCl 浓度 / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	常量元素含量 / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)					
			SiO_2	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	TFe	Al^{3+}
1	石英	纯水	3.0					
2	石英	50 000	2.4					
3	石英	100 000	2.0					
4	石英	150 000	2.0					
5	石英	200 000	1.0					
6	斜长石	纯水	4.4	4.7	1.6	6.6	0.06	0.02
7	斜长石	50 000	1.6	7.0	3.0	5.0	0.62	0.16
8	斜长石	100 000	2.6	3.5	2.6	5.0	2.08	0.18
9	斜长石	150 000	1.4	2.6	1.6	3.4	3.42	0.10
10	斜长石	200 000	1.0	3.0	2.4	1.0	4.58	0.08

注: TFe 指全铁。

① 梅博文. 塔里木盆地油田水地球化学性质与储层性质. 江汉石油学院, 1994

2 结果与讨论

不同 NaCl 浓度的 0.05 mol/L 乙酸钠溶液中矿物溶解的实验结果见表 1。

2.1 氯化钠浓度对 SiO_2 溶解度的影响

从表 1 中可见, 石英颗粒溶液中 SiO_2 的含量随 NaCl 浓度的增加而呈现明显降低 (图 1)。

这种现象的可能原因为, 在高浓度 NaCl 的水溶液, 即高矿化度地层水中, 由于各离子间的电场作用, 离子的量不应再以浓度计算, 而要以活度表示。随着水中矿化度的增加, 水中离子的活度系数不断降低。石英溶解后的单分子硅酸是极弱酸, 在水中电离度极小 ($k_1 \approx 10^{-9}$, $k_2 \approx 10^{-12}$), 在中性水溶液中很难以电离形式存在, 受离子电场的影响也较小^{[9]22}, 因此可认为其活度就低于浓度。

而作为溶剂的水经电离后产生大量 H^+ 和 OH^- , 它们与水中高浓度的其他离子, 如 Na^+ 和 Cl^- , 形成离子簇, 使 H^+ 和 OH^- 活度下降, 并引起水分子的进一步电离。其结果使单位体积或单位质量内的游离水分子数减少, 即溶剂量减少, 相对于 SiO_2 在此溶液中的溶解量减少, 由此所检测的 SiO_2 含量随 NaCl 浓度的增加而降低。虽然普遍认为乙酸根的存在可以与 SiO_2 形成络合物而促进矿物溶解, 但一元羧酸的络合作用毕竟非常有限^[3], 实验观察高浓度 NaCl+0.05 mol/L 乙酸根的条件下 SiO_2 浓度甚至低于纯水中的溶解度 (表 1 中 2 号与 1 号样品比较)。

但在长石颗粒溶液中, SiO_2 含量变化比较复杂。变化趋势除在纯水中 (6 号样品) 有些差别外, 其余与铝的浓度变化基本一致 (图 2)。

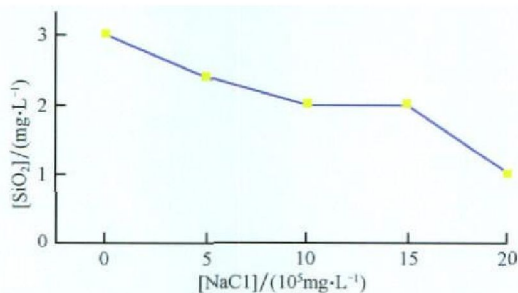


图 1 石英颗粒溶液中 SiO_2 浓度的变化

Fig. 1 Variation of SiO_2 concentration in solution with quartz grain

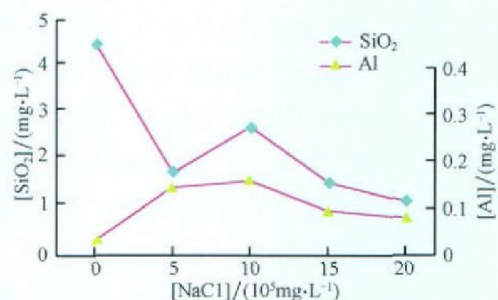


图 2 长石颗粒溶液中 SiO_2 和 Al 浓度的变化

Fig. 2 Variations of SiO_2 and Al concentrations in solution with plagioclase grain

长石结构与石英不同, 硅氧四面体和铝氧四面体排列成空间立体结构, 晶格间有其他不同金属离子。长石在溶液中, 硅的溶解除了受水的活度变化影响外, 还会受到矿物中溶出的其他金属离子及溶液中有机和无机组分的相互作用。与硅一样, 骨架中铝的溶解也会受到同样的作用。但总体上可以观察到, 随溶液中 NaCl 浓度的增加, SiO_2 和铝的溶解作用逐渐下降。

由此可以推测, 由硅 (铝) 氧四面体所组成的矿物, 所受溶蚀作用随地层水矿化度的急剧增加而减小。

2.2 同离子效应

观察表 1, 长石颗粒溶液中一价碱金属 K^+ 离子的浓度明显随 Na^+ 的增加而降低 (图 3), 下降幅度最高比纯水中达 6 倍之多 (1.0 ~ 6.6 mg/L)。

铝硅酸盐类矿物的溶解过程中, 往往有金属离子向水中迁移。以中长石和斜长石为例, 它们在受到酸性水淋滤后, 首先失去大量碱金属和碱土金属离子^[10], 然后硅氧四面体骨架破坏, 变成平面状结构的粘土矿物。如自生高岭石^[7]:

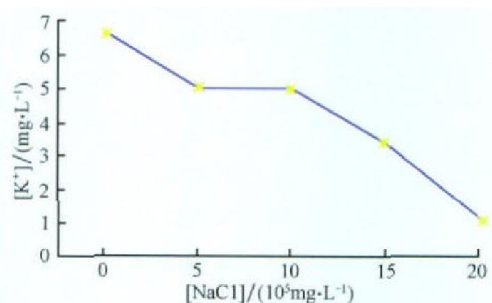
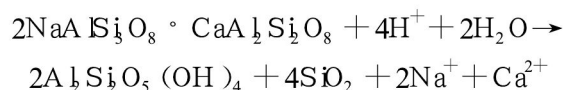


图 3 长石颗粒溶液中 K^+ 浓度的变化

Fig. 3 Variation of K^+ concentration in solution with plagioclase grain

上述反应若达到溶解—沉淀平衡,各物质浓度将遵循如下关系:

$$K = \frac{[\text{Na}^+]^2 [\text{Ca}^{2+}] [\text{SiO}_2]^4}{[\text{H}^+]^4} \quad (1)$$

式中,固体物质的浓度视为 1。一定温度和压力下,平衡常数 K 是一定值,因此当 (1) 式中各离子浓度发生改变时,都可能会影响沉淀和溶解平衡。

已知大多数地层水中的主要离子是钠和氯^[11]。高矿化度地层水中,假定 pH 被缓冲,即 (1) 式中分母值不变;分子项中, SiO_2 受高矿化度影响溶解度极低,通常不超过几十 mg/L ^[12],并且浓度变化不大, Na^+ 浓度却往往高出几万 mg/L ,甚至十几万 mg/L ; 式中又有较高方次。此时,即使 Ca^{2+} 由于受到沉淀作用或被羧酸阴离子络合而减少, (1) 式右边也将是一个极大的值。这表明,上述平衡将向沉淀方向移动,长石溶解速率降低。

K 和 Na 同属元素周期表第 I 主族,它们的离子有相近的性质。在长石中金属离子向水溶液迁移时,水中如果存在大量 Na^+ , 不仅使长石中 Na 的迁移受到阻碍,势必也会对 K 造成影响。

由此可知,高矿化度地层水中,由于同离子效应^[13],对某些含有与水中无机离子相同元素的难溶盐类,尤其是富含碱金属的长石类矿物的溶解是不利的,因而也影响到骨架成矿元素硅、铝的溶解和迁移(图 2)。

对二价碱土金属离子 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} , 实验溶液中,当在水中有乙酸存在时,溶解量增加近一倍(6 号与 7 号样品比较),表明乙酸根促进了这些离子的溶解。与一价碱金属离子比较,二价金属离子与羧酸阴离子的络合作用要大得多。但随着氯化钠浓度的增加,可观察到 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量先是降低(NaCl 浓度为 $15\,000 \sim 5\,000 \text{ mg/L}$),然后又略有上升(NaCl 浓度为 $20\,000 \text{ mg/L}$; 表 1; 图 4)。这种现象可能是因为当溶液中来自长石溶蚀的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量逐渐增加时,相同离子之间的同离子效应占主导作用所致。但更大量非共同离子 Na^+ 和 Cl^- 的增加,其水中浓度达到 $20 \times 10^4 \text{ mg/L}$ 时,会带来另外一种效应——盐效应,使得 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量又略有增加。而总体上,与碱金属的溶解比较,碱土金属受到盐效应的影响程度要小得多(与纯水中比较,浓度改变最大不超过一倍)。

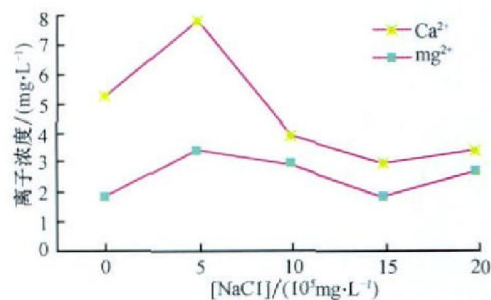


图 4 长石颗粒溶液中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 浓度的变化

Fig. 4 Variations of Ca^{2+} and Mg^{2+} concentrations in solution with plagioclase grain

塔里木盆地部分高矿化度地层水中,仅 Na^+ 浓度就可达十几万 mg/L 。由此可以理解在塔北侏罗—三叠系深部砂岩储层中可以观察到富钠的长石类矿物仍然部分存在,而富钙的斜长石几乎完全溶蚀的现象^①。

2.3 盐效应

实验溶液中除了碱土金属 Ca 和 Mg 在高浓度 NaCl ($20 \times 10^4 \text{ mg/L}$) 条件下浓度有所增加外,全铁浓度也随 NaCl 浓度的增加明显增加(表 1; 图 5)。这可能与高盐度无机离子引起的盐效应^[13] 有关。

高矿化度地层水中,带相反电荷的离子间相互吸引、相互牵制,妨碍了离子间的运动,减少了离子的有效浓度。此时,各离子的浓度以活度表示。溶液中离子活度 (a) 与浓度 (C) 的关系为:

$$a = fC$$

式中, f 为活度系数, $0 \leq f \leq 1$ 。

决定活度系数大小的是电离强度,一般由溶液离子强度 μ 给出:

$$\mu = \frac{C_1 Z_1^2 + C_2 Z_2^2 + \dots + C_n Z_n^2}{2}$$

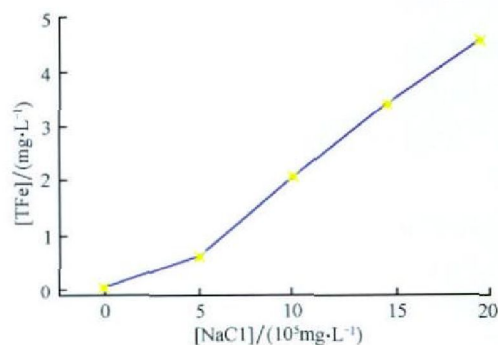


图 5 长石颗粒溶液中全铁 (TFe) 浓度的变化

Fig. 5 Variation of TFe concentration in solution with plagioclase grain

① 梅博文. 塔里木盆地油田水地球化学性质与储层性质. 江汉石油学院, 1994

式中: $C_1, C_2, \dots, C_n$ 为不同离子的浓度, mg/L ;

$Z_1, Z_2, \dots, Z_n$ 为各离子的电荷数。

随矿化度增加, 水中各离子活度降低。对不同电价的离子, 显然电价越高, 活度降低越多。显而易见, 对不同金属离子, 由于带有电荷数的不同, 受盐效应影响的大小顺序为: $\text{Fe}^{3+} > \text{Ca}^{2+}$, $\text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+, \text{K}^+$ 。在没有共同离子存在的情况下, 加大溶液中离子的浓度使形成沉淀的离子相遇的机会减少, 也就是加速了矿物中这些元素向水中的迁移速率, 难溶矿物的溶解度必然增大。通常, 当卤水中总离子浓度不高时, 如氯化钠浓度小于 600 mg/L 时, 可不考虑盐效应的影响^[13]。但如果总离子浓度较高, 对于那些带有较多电荷数的离子, 则溶液中离子强度大、离子活度小, 盐效应表现明显。

因此, 含高价阳离子的难溶矿物在卤水中的溶解度比在淡水中要大。如 CaSO_4 在水中的溶解度约为 $2\,000 \text{ mg/L}$; 而在 NaCl 浓度为 $5\,850 \text{ mg/L}$ 的溶液中, 溶解度则为 $3\,300 \text{ mg/L}$; 当 NaCl 浓度达到 $13 \times 10^4 \text{ mg/L}$ 时, 石膏在其中的溶解度可达 $7\,480 \text{ mg/L}$ ^{[9] 173}。

2.4 卤水中阴离子的络合作用

水中的有机阴离子和无机阴离子都可作为配位体与金属离子形成络合物, 从而增加金属离子在水中的溶解度。在络合反应中, 增加配位体浓度可促进络合物的生成。以实验室中 Cl^- 与 Fe^{3+} 形成络合物为例, 含 $0.01 \text{ mol/L Fe}^{3+}$ 的溶液中, 当存在 1.00 mol/L 的 Cl^- 时, 由累积稳定常数 ($\beta; \lg \beta_1, \lg \beta_2, \lg \beta_3, \lg \beta_4$ 分别为 $1.48, 2.13, 1.99, 0.01$ ^[14]) 计算可得, 由于络离子的形成, 溶液中剩余游离 Fe^{3+} 仅为原来的 9.2% , 其余则以络合物形式存在, 主要为 $[\text{FeCl}]$ 和 $[\text{FeCl}_2]^{2+}$; 而同样浓度的 Fe^{3+} , 当溶液中 Cl^- 只有 0.03 mol/L 时, 剩余游离 Fe^{3+} 形式为 89% , 络合物形式只占 11% 。

在高矿化度地层水中, 无机阴离子浓度, 如 Cl^- , 往往比有机酸阴离子浓度高出几个数量级。在讨论矿物溶解和金属离子的迁移时, 金属离子与 Cl^- 的络合作用成为不可忽视的因素。表 1 和图 5 中全铁量在乙酸浓度不变的条件下随 NaCl

浓度的增加明显上升, 其中形成络合物应该起重要的作用。

Kharaka 等用 SOLMEQ 研究了许多沉积盆地油田卤水中的有机-无机络合物^[15]。结果表明, 油田水中的某些金属离子, 如 Pb 和 Zn 主要是以氯的络合物形式被搬迁的。

铝与其他金属离子不同的是, 铝氧四面体结合在矿物的空间结构中。铝的溶出, 与硅一样, 涉及到矿物结构的破坏。溶液中铝主要以水合物形式存在, 如铝的羟基络合物 $\text{Al}(\text{OH})_4^-$, $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ 共占铝总量的 99% 以上; 而有机络合物的浓度可忽略不计^[15]。当水的矿化度很高时, 水的活度降低, 这时形成铝的水合物必然也会受到影响。因此, 实验水溶液中, 当 NaCl 浓度很高时, 如达到 $15 \times 10^4 \text{ mg/L}$ 甚至 $20 \times 10^4 \text{ mg/L}$ 时 (9 号、10 号样品), 铝的浓度逐渐降低 (图 2)。

塔里木盆地部分高矿化度地层水中, 由盐效应和无机离子的络合作用引起的含非共同离子矿物的溶解现象是很普遍的。据梅博文等的研究, 塔里木塔北隆起侏罗系、三叠系地层水矿化度普遍高达 20 多万 mg/L , 砂岩中仍可观察到丰富的溶蚀孔隙; 与此对应, 地层水中含有较多的高价阴离子和阳离子。轮南油田三叠系第一油组, 高孔、高渗井段总矿化度一般都具有高值, 仅其中的 Ca^{2+} 浓度就达 $1 \times 10^4 \text{ mg/L}$ 多, 有些甚至超过 $2 \times 10^4 \text{ mg/L}$ 。东河塘地区的地层水中, 总矿化度和 Ca^{2+} 离子浓度有着相关关系, 但不成线性关系。当总矿化度 (TDS) 小于 $15 \times 10^4 \text{ mg/L}$ 时, 水中 Ca^{2+} 浓度约为 $2\,000 \text{ mg/L}$; 当 TDS 为 $15 \times 10^4 \sim 20 \times 10^4 \text{ mg/L}$ 时, Ca^{2+} 浓度急剧上升至 $8\,000 \text{ mg/L}$ 左右, TDS 增加约 25% , Ca^{2+} 浓度增加几乎 3 倍, 或几乎是原来的 4 倍; 当 TDS 大于 $20 \times 10^4 \text{ mg/L}$ 时, Ca^{2+} 浓度大多小于 $12\,000 \text{ mg/L}$, 浓度的增加又趋于缓和^①。这正好说明, 储层岩石中更多发生的是碳酸盐胶结物和含高价金属离子矿物的溶解, 一旦溶液中高价金属离子浓度增加, 同离子效应就会起主要作用。

3 结论

1) 高矿化度卤水中, 无机离子间存在着同离

① 梅博文. 塔里木盆地油田水地球化学性质与储层性质. 江汉石油学院, 1994

子效应、盐效应和无机离子对成矿金属元素的络合作用, 因此对不同矿物组分存在溶解差异。实验体系的石英颗粒溶液中, SiO_2 含量随 NaCl 浓度的增加而明显降低; 而长石颗粒溶液中, 各成矿元素的含量变化较复杂。对不同电荷数的金属离子, 溶出的程度有较大差异, 并随 NaCl 浓度的增加表现出不同的变化趋势。

2) 实验观察到, 高浓度 NaCl 溶液中, 不利于骨架结构的硅氧四面体和铝氧四面体的溶蚀; 由于同离子效应, 会降低长石首先溶出碱金属的速度; 但盐效应以及无机阴离子 Cl^- 的络合作用, 对高价金属离子的溶解有促进作用。

参 考 文 献

- 1 Surdam R C, Crossey L J, Svenhagen E, et al Organic-inorganic interactions and sandstone diagenesis [J]. AAPG Bulletin 1989 73 (1): 1—23
- 2 Hajash A, Mahoney A L, Elias B P. Role of carboxylic acids in the dissolution of silicate sands: an experimental study at 100°C , 345 bars [J]. Geol Soc Am Abstr 1989 21: A29
- 3 陈传平, 固旭, 周苏闽, 等. 不同有机酸对矿物溶解的动力学实验研究 [J]. 地质学报, 2008 82 (7): 1 007 ~ 1 012
- 4 曾溅辉, 吴琼, 杨海军, 等. 塔里木盆地塔中地区地层水化学特

征及其石油地质意义 [J]. 石油与天然气地质, 2008 29 (2): 223 ~ 229

- 5 陈传平, 梅博文, 马亨, 等. 水溶液中硅质絮状沉淀物的实验研究 [J]. 石油与天然气地质, 1994 15 (4): 316 ~ 321
- 6 向廷生, 蔡春芳, 付华娥. 不同温度、羧酸溶液中长石溶解模拟实验 [J]. 沉积学报, 2004 22 (4): 597 ~ 601
- 7 陈传平, 梅博文, 毛治超. 二元羧酸对硅酸盐矿物溶解的实验初步研究 [J]. 矿物岩石, 1993 3 (1): 103 ~ 107
- 8 李鹏春, 刘春晓, 张渊, 等. 塔中奥陶系地层水化学特征及其成因与演化 [J]. 石油与天然气地质, 2007 28 (6): 803 ~ 808
- 9 李学礼. 水文地球化学 [M]. 北京: 原子能出版社, 1982. 22 ~ 23, 173 ~ 174
- 10 黄思静, 杨俊杰, 张文正, 等. 不同温度条件下乙酸对长石溶蚀过程的试验研究 [J]. 沉积学报, 1995 13 (1): 7 ~ 17
- 11 柯林斯 A G (美). 油田水地球化学 [M]. 林文庄, 王秉忱, 译. 北京: 石油工业出版社, 1984. 38 ~ 42
- 12 陈静生. 环境地球化学 [M]. 北京: 海洋出版社, 1990. 53 ~ 54
- 13 黄可龙. 无机化学 [M]. 北京: 科学出版社, 2007. 138 ~ 140
- 14 张祥麟. 络合物化学 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1979. 178 ~ 179
- 15 Kharaka Y K, Law L M, Carothers W W, et al Role of organic species dissolved in formation waters from sedimentary basins in mineral diagenesis [A]. In: Roles of organic matter in sediment diagenesis [C]. BEPM Special Publication 1986 38: 111 ~ 122

(编辑 李 军)

(上接第 661 页)

- 2 Larter S R, Aplin A C. Reservoir geochemistry: a link between reservoir geology and engineering [J]. SPE Reservoir Engineering 1997 2 (7): 1 079—1 153
- 3 Larter S R, Aplin A C, Corbett P, et al Reservoir geochemistry: a link between reservoir geology and engineering [J]. Society of Petroleum Engineering 1994: 28849
- 4 金晓辉. 油田开发动态色谱指纹监测理论模型及应用 [D]. 成都理工大学, 2000
- 5 Kaufman R L, Ahmed A S, Moldowan J M. A new technique for the analysis of commingled oils and its application to production allocation calculations [R]. Proceedings of the Sixteenth Annual Convention of Indonesian Petroleum Association, Indonesian Petroleum Association 1987. 247—268
- 6 林壬子. 油气勘探与油藏地球化学 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1998
- 7 Larter S R, Aplin A C. Reservoir geochemistry: methods, application and opportunities [J]. The Geochemistry of Reservoir 1995 86: 5—32
- 8 Larter S R. Reservoir geochemistry as reservoir appraisal and management tool: an evaluation [J]. AAPG Bulletin 1995 79: 1 228
- 9 金晓辉, 朱丹, 林壬子. 油田开发动态色谱指纹监测技术的数

学模拟研究 [J]. 石油勘探与开发, 2001, 28 (4): 48 ~ 54

- 10 Hwang R J, Ahmed A S, Moldowan J M. Oil composition variation and reservoir continuity Unity field Sudan [J]. Organic Geochemistry 1994 21: 171—188
- 11 Hwang R J, Baskin D K. Reservoir connectivity and oil homogeneity in a large scale reservoir [J]. Middle East Petroleum Geoscience 1994 94 (2): 529—541
- 12 England W A, Mackenzie A S, Mann D M, et al The movement and entrapment of petroleum fluids in the subsurface [J]. Geology Society 1987 144: 327—347
- 13 England W A. The organic geochemistry of petroleum reservoirs [J]. Org Geochem 1990 16 (1—3): 41—425
- 14 England W A, Mann A L. Migration from source to source to trap and filling and mixing [J]. AAPG Bulletin 1990 28 (2): 1 002—1 092
- 15 丘比特 J M, 英格兰 W A. 油藏地球化学 [M]. 王铁冠, 张枝焕, 译. 北京: 石油工业出版社, 1997
- 16 王培荣. 生物标志物质量色谱图 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1993

(编辑 董 立)