

陆源碎屑岩的 碱性成岩作用

邱隆伟 姜在兴 编著 ●

地质出版社

陆源碎屑岩的碱性 成岩作用

邱隆伟 姜在兴 编著

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书提出了“碱性成岩作用”的概念,探讨了成岩作用过程中陆源碎屑岩储层中主要造岩矿物的稳定性,以及储层中石英溶解的原因和石英直接溶解现象的识别方法,总结了碱性成岩作用下成岩事件的发育特征及其对储集空间的影响,并对泌阳凹陷核桃园组和塔西南坳陷柯克亚地区西河甫组储层中碱性成岩作用的成因进行了初步研究。

本书可供地质类高等院校师生以及从事沉积学、石油地质学等专业的科研人员及油田技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

陆源碎屑岩的碱性成岩作用/邱隆伟等编著. —北京:
地质出版社, 2006. 8

ISBN 7-116-04976-2

I. 陆... II. 邱... III. 陆相-碎屑岩-成岩作用
-研究 IV. P588. 21

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 102787 号

LUYUAN SUIXIEYAN DE JIANXING CHENGYAN ZUOYONG

责任编辑: 祁向雷

责任校对: 关风云

出版发行: 地质出版社

社址邮编: 北京海淀区学院路 31 号, 100083

电 话: (010) 82324508 (邮购部); (010) 82324577 (编辑部)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

电子邮箱: zhs@gph.com.cn

传 真: (010) 82310759

印 刷: 北京印刷学院实习工厂

开 本: 787 mm × 1092 mm ¹/₁₆

印 张: 7.25

字 数: 200 千字

印 数: 1—800 册

版 次: 2006 年 8 月北京第一版·第一次印刷

定 价: 25.00 元

ISBN 7-116-04976-2/P · 2723

(凡购买地质出版社的图书, 如有缺页、倒页、脱页者, 本社出版处负责调换)

前 言

成岩作用是影响储层物性的最重要的因素之一，在成岩作用过程中，由于温度、压力、流体等因素的综合作用、水-岩反应以及造岩矿物之间的相互转化而影响岩石中次生孔隙的形成和分布。

成岩作用中，矿物的溶解与沉淀和成岩环境是密不可分的，地层水的特性（特别是酸碱性）是成岩环境的重要组成部分之一。地层水酸碱性的变化将导致成岩环境的不同，由此可以分为酸性成岩环境和碱性成岩环境。我们在对泌阳凹陷核桃园组以及塔西南坳陷柯克亚地区西河甫组储层的前期研究中，根据沉积环境、沉积岩（物）特征以及成岩演化等方面的研究，认为上述地区储层的成岩演化总体以碱性成岩环境为背景，即酸性成岩环境的作用时间以及影响都较弱，而碱性成岩环境在成岩作用过程中起着关键性作用，因此认为上述两个地区的成岩作用在类型上属于碱性成岩作用。碱性成岩作用是总体以碱性地层水活动为背景所形成的，以石英溶解及石英溶解型次生孔隙显著存在为主要特征的成岩作用类型。

目前，人们普遍认为储层中的次生孔隙都是在酸性孔隙水的作用下，由长石、碳酸盐矿物等酸不稳定矿物的溶解所形成的；碱性成岩观点则认为在储层中也存在着以石英溶解为成因的次生孔隙，因此无论在成岩环境还是在孔隙成因类型上，碱性成岩作用与经典成岩作用中的现有观点都是有所差异的。不过碱性成岩作用并不排斥经典的成岩作用，它所提供的是人们认识储层本来面貌的一个新的方面和可能性，因此实际上碱性成岩作用是经典成岩作用的完善和发展。

碱性成岩作用的形成是陆源碎屑岩中造岩矿物组成、沉积、成岩、地层结构等因素综合作用的结果。上述因素起作用的方式和程度目前研究还远远不够，但是碱性古湖盆的发育能够为碱性成岩作用的形成提供非常有利的条件，这种看法应当很容易为大家所接受。我国有许多盆地存在碱性沉积环境或成岩环境，除泌阳凹陷外，江汉盆地潜江凹陷（冯增昭，1993）、东濮凹陷（孙永传，1996；李忠，2000；杨香华，2002）等在沉积过程中都存在明显的碱湖相沉积，在一些盆地也发现了碱性成岩环境的主导性作用，如酒东盆地营

尔凹陷中生界以碱性、偏碱性的成岩环境为主（赵伦，1998）。此外，在许多盆地的火山岩发育区因火山物质的水解等因素的影响，也可能导致碱性成岩环境的持续性存在。因此仅从上述情况即可看出，碱性成岩作用的发育必定不是特例。

从应用上来看，与碱性成岩作用相伴而形成的石英溶解现象以及石英溶解型次生孔隙也可能为油气储层评价提供新的依据和途径，此外，对于储层中石英自生加大、沉积地层中硅质胶结，乃至金属矿床中以及地表的许多硅化现象等也可提供新的解释。

碱性成岩作用是成岩作用研究中的一个新的方向。在碱性成岩作用的机理及其对储层的影响等方面尚有许多问题需要进一步深入研究。本书仅对其有关主要造岩矿物在地层水中的稳定性、石英溶解的地球化学机制及识别标志、碱性成岩作用下储层成岩事件的发育特征以及碱性成岩作用的成因等问题进行了初步探讨。其目的是起到抛砖引玉的作用，希望它能对相关人员有所启迪，并在实践中得到不断修正、补充、深化和完善。

由于受研究时间以及认识水平等诸方面因素的制约，书中错误与不足在所难免，衷心欢迎各位读者批评指正。

目 录

前 言

1 概述	(1)
1.1 碱性成岩作用概念的提出	(1)
1.2 碱性成岩作用可能解决的问题	(3)
1.3 本书的主要观点和认识	(5)
2 碎屑岩主要造岩组分特征及其在地层水中的稳定性	(8)
2.1 石英及长石颗粒的稳定性	(8)
2.2 碳酸盐矿物的稳定性探讨	(14)
2.3 其他胶结物的稳定性	(22)
2.4 粘土矿物的稳定性	(26)
3 成岩事件及成岩环境	(29)
3.1 成岩事件发育特征及其环境因素	(29)
3.2 成岩演化过程中成岩环境的变化	(45)
4 储层中石英溶解的表象及成因	(49)
4.1 储层中石英溶解现象的存在及其判定	(49)
4.2 石英溶解的过程和机制	(57)
4.3 石英水溶物的类型及其和环境的关系	(61)
4.4 石英溶解的影响因素	(68)
5 碱性成岩作用下成岩事件的发育特征及其对储层的影响	(73)
5.1 典型地区碱性成岩事件	(73)
5.2 碱性成岩作用过程中矿物组分的成岩表现	(86)
5.3 碱性成岩作用对储层物性的影响	(89)
6 碱性成岩作用的成因	(94)
6.1 泌阳凹陷碱性古湖盆储层中碱性成岩作用成因	(94)
6.2 柯克亚地区干旱气候表生储层碱性成岩作用成因	(102)
主要参考文献	(107)
图版	(111)

1 概 述

1.1 碱性成岩作用概念的提出

油气都赋存于储集岩中,成岩作用是决定碎屑储集岩储层性质最主要的因素之一。

成岩作用的概念最早由冈布尔(Von Gumbel)于1868年提出,曾被应用于冰川学、地球化学等不同学科,但早期并未被地质学家广泛接受(刘宝珺,1994),1894年经瓦尔特(Walther)提倡开始应用于沉积学中,从此成岩作用成为沉积学的一个分支学科。瓦尔特关于成岩作用的定义为:“沉积物在其沉积之后,在没有岩石压力和岩浆热力的影响下向岩石转变中所有的物理的和化学的变化”(刘宝珺,1994)。

在20世纪40~50年代以前,沉积学主要是针对沉积作用过程的;50~70年代它也只限于一些描述性的工作,或者是单纯岩石学方面的研究(郑浚茂,1989);由于大多数沉积地质学家认为沉积矿床在沉积作用或至多同生沉积期就已形成(孙永传,1996),因而成岩作用研究长期以来并未受到地质界的重视。70年代中期开始,由于世界性的能源危机以及砂岩中大量由成岩作用形成的次生孔隙被人们广泛接受和认识,促使石油地质学家和沉积学家对于成岩作用给予了越来越大的重视,并通过成岩作用的理论来重新评价油气地质演化过程和油气储层储集空间的形成和演化历史(Hower, 1976; Curtis, 1977; Schmidt and McDonald, 1977);新的技术和实验方法不断应用于成岩作用研究中,成岩作用研究由此开始进入了一个快速发展的阶段。80年代以来,有关成岩作用的研究已被列为沉积学和储层地质学的一个极为重要的方向;由于非构造油藏的研究逐渐成为油气勘探的主要领域,成岩圈闭的研究也一直被列为重点研究的课题。

成岩作用在理论提出的早期并没有受到应有的重视,在次生孔隙发现以及与油气储层研究相结合之后,成岩作用研究才得以蓬勃发展,因此成岩作用研究的目的是在很大程度上是为次生孔隙的评价和预测服务的。

影响储层孔隙演化的因素很多,储层的温度、压力、流体的性质及流速以及体系的封闭与开放等物理化学因素都直接影响矿物/流体的反应过程和碎屑储集层孔隙度的演化(穆曙光,1994)。在上述因素中流体的性质起着至关重要的作用,它决定了矿物在成岩作用过程中的稳定性及沉淀和溶解的状况。目前多数学者认为,溶蚀型次生孔隙是由碳酸或者是有机酸引起矿物溶解所形成的(郑浚茂,1989;徐北煤,1994;庄松生,1998;游俊,1999),因此酸性地层水条件下所形成的次生孔隙的形成和分布规律是成岩作用研究在应用上的归属,或者可以认为酸性溶解过程及其影响是经典成岩作用研究的出发点。

碎屑岩储层中的造岩矿物主要有石英、长石、岩屑,以及碳酸盐矿物等胶结物。在酸性地层水的作用下,被溶解的物质主要是长石、岩屑等不稳定颗粒及碳酸盐、沸石等胶结物(朱国华,1985)。石英是自然界一种非常稳定的矿物,同时也是多数碎屑岩储层中含

量最多的碎屑组分，对于该矿物在储层中的成岩变化，人们所注意的一般是它的压溶和次生加大现象及其对储层的影响，而对其是否发生过溶解则很少有人给以足够的重视，至于石英颗粒边部的溶解痕迹，则认为是先为碳酸盐矿物交代，后来交代物发生溶解而使颗粒被间接溶解（王振奇，1998）。

那么在储层埋藏成岩演化的漫长过程中，是否只有酸性流体的活动，或者说是否存在碱性流体的活动？碱性流体到底能否对储层演化及孔隙发育造成大的影响？

对于前面一个问题的回答是肯定的。碎屑沉积物在沉积之初到固结成岩的历程中会经历同生期、早成岩期和晚成岩期等成岩阶段，在各个阶段由于有机质演化以及水-岩反应等因素的影响，地层水性质总是在不断地变化着。酸性流体的产生和沉积物中有机质演化有非常密切的关系，但是在埋藏成岩作用过程中也存在许多减弱地层水酸性程度的因素，如细菌的活动以及造岩矿物和流体之间发生的反应等，从而使得地层水 pH 值逐渐升高。蔡春芳（1997）认为当地温低于 80℃ 时，微生物非常活跃，生成的有机酸很快被细菌消耗，而当地温达到 90℃ 时（ R_o 为 1.3 % ~ 2 % ），有机质开始大量成熟，生成丰富的凝析油和湿气，从而抑制了有机质脱羧基作用， CO_2 来源减少，使孔隙水介质条件必然由酸性向碱性转化，最终导致砂岩从酸性成岩环境进入碱性成岩环境（Sullivan et al. , 1991）。有些学者还针对富含有机质的沉积物做过实验研究，结果都表明沉积物在演化过程中将会向 pH 值升高的方向转化。据 E. 施塔赫（Stach）等人的资料，低位沼泽 pH 值为 4.8 ~ 6.5，高位沼泽的酸性一般较强，pH 值为 3.3 ~ 4.6，随着早期成岩作用的发生，在由泥炭转化为褐煤的过程中，腐殖酸转化为腐殖质，到长焰煤阶段时，腐殖酸已全部消失，泥炭酸度因而减弱，pH 值随埋深增加而逐渐增大；陆伟文教授还对沼泽化过程中介质条件的变化进行过实验模拟，结果表明，在沼泽化过程中，起始阶段 pH 值较小，介质酸性较强，而在气体大量产出期，其 pH 值近于 7，介质呈中性；其后介质逐渐转化为弱碱性（转引自郑浚茂，1997）。上述两项研究是针对富含有机质的沉积物（含煤地层）而进行的，它所含有的有机质以及演化过程中所能形成的酸性组分的量，是正常泥岩和砂岩所不能相比的，而含煤地层所产生的有机酸，要比其它地层高数百倍（郑浚茂，1997），因此正常泥岩和砂岩在埋藏成岩演化过程中地层水偏碱性的程度会更高；刘宝珺也认为在正常水盆的同生作用带为氧化条件的情况下，其下的成岩作用带则是还原环境，由于厌氧嫌气细菌的作用，pH 值稳定上升，常可达到 9（刘宝珺，1992）；在成岩作用的研究实践中也有相应的报道，如朱彤对新厂气田储层的研究认为从准同生到早成岩 A 期，再到早成岩 B 期，地层水的 pH 值是逐渐增加的（朱彤，1999）。因此可以说，在碎屑岩埋藏成岩过程中碱性流体的活动在大多数情况下是存在的。酸不稳定矿物如方解石和白云石能够在多数碎屑岩储层中作为最重要的胶结物形成并保存下来，也表明碱性地层水环境确实存在过，而早期碳酸盐胶结物以及晚期碳酸盐胶结物在碎屑岩储层中的存在表明碱性流体有多期活动的可能性。

对于第二个问题，回答也应当是肯定的。只要碱性流体存在，它就必然对储层造成影响，仅由于碱性流体碱性程度及活动时间不同而导致的影响程度不同而已。酸不稳定胶结物的存在是其影响的一个方面，对于储层中最主要的碎屑组分——石英，也将产生显著的溶解改造。有关石英的溶解，有许多学者进行过研究（Evans, 1990; Dove, 1994; Tester, 1994），国内也有一些学者，如史宏才（1998）等，也进行过石英溶解实验，结果都

表明石英是可以溶解的。在我们的前期研究中发现泌阳凹陷核桃园组储层中, 石英颗粒存在显著的溶解现象, 已有的图像分析结果表明石英被溶解的部分在视域中所占的面积比为 2% ~ 7% 者常见。可以预见随着研究程度的深入, 有关碱性流体对储层影响的了解将会越来越多。

成岩作用是沉积物随埋深的增加而必定经历的转化过程。在此过程中, 通过温度、压力、流体等因素的综合作用、水-岩反应以及造岩矿物之间的相互转化而影响岩石中次生孔隙的形成和分布, 进而对储层物性造成深远的影响。成岩作用中矿物的溶解与沉淀和成岩环境是密不可分的, 地层水的特性(特别是酸碱性)是成岩环境的重要组成部分之一。地层水的酸碱性的变化将导致成岩环境的不同, 由此可以分为酸性成岩环境和碱性成岩环境。但是, 以前的研究都一直对碱性成岩环境的描述加以回避, 直到 1996 年陈忠通过矿物在碱性驱替剂中的化学行为、实验资料总结以及储层中胶结物的存在等七个方面的证据, 说明“碱性成岩环境在成岩演化过程中确实存在”。在近几年的文献中, 有关碱性成岩环境以及酸性成岩环境的叙述才相对多见(赵伦, 1998; 王琪, 1999; 吕明, 1999; 陆永潮, 1999)。

我们在对泌阳凹陷的前期研究中, 根据沉积环境、沉积岩(物)特征以及现今地层水特征等方面的研究, 确认该地区储层的成岩演化总体以碱性成岩环境为背景, 酸性成岩环境的作用时间以及影响都较弱, 而以碱性成岩环境的作用表现得明显。正如前面所述, 以前的成岩作用研究实际上强调酸性成岩环境的作用及其对次生孔隙的影响, 在此我们称之为经典的或传统的成岩作用研究, 而把如泌阳凹陷存在的以碱性成岩环境为背景的成岩作用称之为碱性成岩作用。这里所说的碱性成岩作用是总体以碱性地层水活动为背景所形成的, 以石英溶解及石英溶解型次生孔隙显著存在为主要特征的成岩作用类型。碱性成岩作用强调碱性水在次生孔隙形成中的作用(邱隆伟, 2001)。

1.2 碱性成岩作用可能解决的问题

碱性成岩作用作为陆源碎屑岩储层研究中新的研究方向, 还有许多问题需要进行深入研究, 其应用也尚处于开始阶段, 从现在的认识来看, 该研究方向可能解决的问题还主要是方向性的, 主要有以下几个方面。

1.2.1 促使人们加强对成岩环境及其影响的认识和研究

碎屑储集岩的成岩环境是控制成岩作用类型的主要因素。在不同成岩环境中其成岩作用的类型、强度和自生矿物种类、组合及岩石结构、孔隙类型和结构特征均存在着显著差异(王琪, 1999)。成岩环境包括储层矿物组成、温度、压力以及水介质化学性质等。其中储层矿物组成是构成成岩环境的物质基础, 同时也在很大程度上影响着介质水化学性质的特征及演化; 温度和压力一般对沉积物(岩)的压实压溶强度(刘宝珺, 1992)以及粘土矿物的转化等成岩事件产生较大的影响; 成岩介质水化学性质的变化是成岩作用发生的重要原因, 它控制了成岩作用过程中的水-岩反应以及造岩矿物的溶解和沉淀状况。

pH 值是成岩水化学性质最重要的因素。pH 值的变化十分明显地控制了成岩作用的发生及演化, 既造成了各种成岩矿物的产生及其演化, 又促进了储集物性的改变(王留奇,

1993)。从上述意义上说 pH 值在很大程度上造成了成岩环境的差异。根据地层水酸碱性的不同可以划分出酸性成岩环境和碱性成岩环境,造岩矿物在不同的成岩环境中具有不同的成岩行为。如在酸性成岩环境以及碱性成岩环境中,石英、长石等主要碎屑矿物及碳酸盐矿物、粘土矿物等主要填隙物将具有不同的性状和行为,而成岩环境随埋藏历程的变化必将导致陆源碎屑岩储层中主要造岩矿物稳定性的变化,并由此对储层性质造成深远的影响。碱性成岩作用强调碱性水在储层演化过程中所起的主导性作用,但是其研究是建立在对成岩环境深入研究基础上的,或者可以认为成岩环境的研究是其最基础的研究内容。

1.2.2 正确认识储层不同成因类型的孔隙

砂岩储层的孔隙发育和保存是油气储层研究的核心内容,亦是沉积盆地油气勘探要解决的实际问题(寿建峰,1998)。由于成岩作用对次生孔隙的形成和保存具有深远的意义,因此对储层成岩作用的研究最终都归结到它对孔隙的影响以及有利孔隙发育带的预测上。

次生孔隙来自于储层中各种矿物组分的溶解。储层中主要矿物组分有石英、长石、碳酸盐矿物、粘土矿物等。次生孔隙的形成必须具备三个条件:①有足够数量的原生孔隙;②酸溶性岩石组分的存在;③酸性水的存在(庄松生,1998)。酸性水的溶解作用是产生大量次生孔隙的重要因素(游俊,1999)。在酸性地层水的作用下,长石及碳酸盐矿物发生溶解而形成次生孔隙。强调碳酸、有机酸及酚类对碳酸盐矿物的溶蚀与迁移是砂岩储层次生孔隙形成经典理论的最大特点(陈忠,1996)。这种以酸性水为基础的孔隙发育模式,多数情况下和实际情况是相符合的。而由于储层沉积及成岩环境的差异,埋藏成岩作用过程中地层水的性质及变化规律也各不相同,甚至同一地区储层或同一层砂体在埋藏过程中都会经历酸碱性的变化,只不过酸碱性地层水作用的时间长短不同而已。

石英是储层中最稳定的组分之一。在地下埋藏成岩条件下,特别是在碱性水作用下,石英的溶解变得容易(Evans, 1990; Dove, 1994; Tester, 1994; 郑浚茂, 1989; 杜乐天, 1986; 张生, 1997),这时长石和碳酸盐矿物却是稳定的,因而在酸性和碱性成岩环境中,储层中矿物组分溶解和沉淀的特征也是不同的。既然碱性成岩环境在储层埋藏成岩作用过程中是存在的,那么就必然会出现以其作为主要成岩环境的情况,此时石英等碱不稳定组分在多数情况下处于不稳定状态,而必然发生溶解形成次生孔隙。

自从 Nutting (1934) 和 Chepikov (1961) 提出了砂岩储层次生孔隙的概念和理论(郑浚茂, 1989), 油气储集层的孔隙空间分为原生孔隙和次生孔隙两种类型。其中次生孔隙据其成因又可分为胶结物被溶解型孔隙和长石等碎屑颗粒溶解型孔隙等。尽管石英溶解现象至今还没有引起研究者的广泛注意,笔者在前期研究表明储层中确实存在石英直接溶解而形成大量次生孔隙的现象,由于石英溶解次生孔隙和酸不稳定矿物溶解所形成的次生孔隙具有截然不同的成因机制,石英溶解型次生孔隙的发现无疑可以丰富人们对储层次生孔隙成因的认识,从而正确认识储层中所存在的孔隙及其成因。

1.2.3 为储层的评价和预测提供新的思路

如何预测砂岩次生孔隙发育带的分布状况,是广大油气勘探人员最为关注的问题(裘怿楠, 1994)。经典成岩作用体系下成岩事件及次生孔隙等随埋深或成岩阶段的变化

特征已有很多人进行了研究, 并已形成许多较成熟的认识。如认为在原生有效碎屑岩体的埋藏成岩过程中, 导致胶结物或碎屑组分发生大规模溶解的孔隙流体性质的变化主要表现为孔隙流体 pH 值的大幅度降低 (刘林玉, 1998), 因而一般认为溶蚀型次生孔隙分布于有机质成岩演化的成熟期, 与伊/蒙混层粘土矿物中蒙皂石的迅速转化带往往是一致的 (林西生, 1992); 有机质的成熟期同时也是有机酸产生的高峰期, 因此次生孔隙多数形成于晚成岩 A 期 (陈丽华, 1994); 如果按应凤祥 1992 年的划分规范, 次生孔隙主要发育带也应分布在晚成岩 A 期。

对于介质酸碱性的变化而导致的成岩环境的变化, 碳酸盐矿物是最为敏感的。一般来说, 方解石、白云石多形成于早成岩 B 期阶段, 而含铁碳酸盐矿物则多形成于晚期成岩阶段 (王振奇, 1998; 裘怿楠, 1996; 刘宝珺, 1992; 赵伦, 1998)。由于碳酸盐矿物的碱稳定性, 可以认为在早成岩 B 期以及晚成岩期都可能存在碱性成岩环境。依据经典次生孔隙成因理论, 碳酸盐矿物沉淀期对次生孔隙的形成和保存是十分不利的。赵伦 (1998) 认为偏碱性的成岩环境有利于自生矿物的沉淀, 但岩石的溶解作用减弱, 因此不利于次生孔隙的形成, 陆永潮 (1999) 在 YA13-1 气田下第三系研究中也认为早期成岩的特征孔隙类型为原生残余粒间孔隙, 无次生淋滤和蚀变孔隙。有资料显示碱性环境未必一定不利于次生孔隙的发育, 如叶瑛 (1999) 认为碱性环境中的钠长石化作用亦有利于次生孔隙发育, 而前期研究也表明储层中石英溶解是可能的, 尽管目前对于碱性成岩作用下储层中次生孔隙发育规律的认识还较肤浅, 不过由于成因上存在的明显差异, 碱性成岩作用体系下储层中次生孔隙发育带在分布上将和经典成岩作用有很大的差异, 有可能在时间上有明显的提前, 而且在晚成岩期也有一个以上次生孔隙带的发育。

不同地区碱性成岩作用的特征是不同的, 通过对有利研究区成岩环境和成岩历程的详细分析和总结, 可以弄清这种成岩作用下孔隙的形成历程及分布规律, 从而为储层的评价和预测提供新的思路。

1.2.4 可以为一些相关地质问题提供新的解释

二氧化硅的溶解度随温度升高而逐渐增大 (Pettijhon, 1987; Patricia, 1994; 杨照柱, 1998)。储层在埋藏成岩作用中往往具有较高温度, 其埋藏也是一个漫长的地质过程, 在这种情况下碱性成岩作用必然要伴随石英等碱不稳定矿物较大规模的溶解, 溶解作用所释放出的硅质将随地层水的运移而迁移, 并在适当的条件下发生沉淀或交代作用。因此碱性成岩作用下石英溶解现象的存在及其稳定性的变化, 还可以为一些相关的地质问题, 如储层中石英的溶解现象本身、硅质胶结的成因、低渗储层成因、金属矿床中硅化现象以及沉积层中硅质岩成因等提供新的解释。

1.3 本书的主要观点和认识

本书通过对碱性成岩作用提出的理论背景、碎屑岩中主要造岩矿物的稳定性、储层中石英溶解现象、碱性成岩事件的发育特征以及碱性成岩作用的成因等内容的初步研究, 在充分吸取和总结前人研究成果的基础上, 主要取得了以下认识。

1.3.1 碱性成岩作用的概念

碱性成岩作用是总体以碱性地层水活动为背景下所形成的,以石英溶解及石英溶解型次生孔隙显著存在为主要特征的成岩作用类型。碱性成岩作用强调碱性水在次生孔隙形成中的作用。碱性成岩作用并不排斥现有的成岩作用理论,而是它的完善和发展。

1.3.2 碎屑岩中主要造岩矿物的溶解特性和稳定性

石英在 pH 值小于 8 的时候,其溶解度很低,溶解速度也很慢,而且几乎不会随着 pH 值变化;当 pH 值增加到 9.0 以上的时候,溶液中的 SiO_2 总量急剧增加;石英是相对稳定的形式,它比非晶质氧化硅更容易从溶液中沉淀析出,低温时更是如此。

长石的溶解受温度、pH 值及有机酸类型等的影响。钾长石的溶解对埋藏温度的变化相对较敏感。在埋藏成岩作用过程中,钠长石和钾长石的溶蚀速度相近,钙长石则比二者明显易溶蚀;温度升高对钙长石和钠长石的溶解影响不大或使其溶解速度有所降低,而钾长石的溶解能力则有较明显的提高。长石的溶解和有机酸的存在有着密切的关系。上述三种长石的溶解度随地层水酸性程度的增加而增强,在中性和弱碱性条件下,长石的溶解度最小,而随溶液逐渐向强碱性过渡,三种长石的溶解度又有非常轻微的回升趋势;如果不考虑长石颗粒在埋藏成岩过程中地层压力、pH、有机酸以及孔隙流体流动状况等因素的影响,在标准状态下斜长石比钾长石更容易发生蚀变和溶解。

在地表常温常压的弱酸系统中,方解石的溶解速度大于白云石(方解石的溶蚀速度初始值为白云石的 1~7 倍);石灰岩和白云岩的溶蚀率总体随岩石中白云石含量的增加而减小,总体而言石灰岩的溶解能力大于白云岩。在地下埋藏环境中,方解石和白云石与弱酸反应的趋势和地表相差较大,表现为白云石反应的趋势大于方解石,表明白云石很可能比方解石容易和弱酸发生反应;随着埋深的增加和温度及压力的增加,白云岩和弱酸反应的溶解速度增加的幅度要大于石灰岩。碳酸盐岩屑在碎屑岩储层中的稳定性低于同成分的碳酸盐胶结物,这种类型的岩屑在埋藏成岩作用中更容易受地层水中 H^+ 的影响而发生溶解。

石膏形成于偏碱性以上的环境,它在酸性环境中处于相对不稳定状态,不过在 pH 值大于 4 的情况下,石膏的溶解度变化很小,而只有在强酸作用下才能发生溶解。石膏的溶解度随温度的增加会有较明显的增大。沸石类矿物是碱性沉积和成岩环境的良好指示矿物。

1.3.3 储层中石英直接溶解的识别标志

储层中石英的溶解识别标志有:部分溶解、颗粒边缘接触线的溶解、溶蚀残骸、硅质胶结的溶解、伸长型孔隙、超粒大孔隙、燧石岩屑或石英质岩屑中的蜂窝状孔隙等。

石英直接溶解可以通过以下微观特征的组合来进行识别:①石英的悬浮颗粒、少量加大边的存在和溶解以及长石自生加大组合;②石英颗粒边部的港湾状溶解和石英颗粒接触缝的溶蚀扩大;③石英加大边被溶和晚期碳酸盐胶结物缺乏组合;④燧石及石英质岩屑中的微细蜂窝状溶解孔隙;⑤石英颗粒间接接触缝的开启和早期碳酸盐胶结物的较好保存组合;⑥石英颗粒的强烈溶蚀和碳酸盐岩屑的完好保存组合。

1.3.4 石英溶解的机制

电解质溶液中石英的溶解受配合物种属因素、溶解反应的化学动力学因素等的影响。石英溶解的本质是电解质溶液中离子对石英表面的电荷作用导致 Si 原子配位数增加的结果。电解质溶液中阳离子在石英表面的吸附破坏了石英的表面结构,导致水接近 Si-O-Si 的几率增大,使溶解速度得到提高,而表面配合物的反应性不同,石英的溶解速度也不同。在任何温度、近自然环境的 pH 范围内,一价和二价的阳离子通过静电吸引来改变石英表面结构,阳离子类型可以影响氧化硅的水解速率与阳离子表面断键位的数目,从而对石英溶解造成影响。二氧化硅溶解于水中所形成的水溶性物质主要有硅酸等氧化硅单体物种、解离酸根、 $\text{Si}(\text{OH})_4\text{SiO}_4^{2-}$ 配合物、 $(\text{K}, \text{Na})\text{Si}(\text{OH})_5$ 单聚物,还可以呈现二聚物和多聚物等形式存在。

陆源碎屑岩储层中的石英颗粒在溶解过程中受到 pH 值、地层压力、地温以及地下水的盐度等的共同作用,石英的溶解是上述因素共同作用的结果。随着温度的升高,氧化硅的溶解度急剧上升。对于属于结晶质的石英来说,其溶解度比氧化硅低很多,但是其随温度增加其溶解度发生增加的幅度则更为明显。压力的升高有利于石英的溶解。

1.3.5 碱性成岩作用对储层的影响

在碱性成岩作用的影响下,由于碱性成岩环境的主导性作用,成岩事件的发育特征和经典以酸性水起主导性作用的成岩作用相比存在一些差异,同时也会导致储层在组分和结构上出现一些特殊性。表现为石英颗粒的大规模溶解,并形成丰富的石英溶解型孔隙;长石颗粒以大幅的加大为特征(也可以出现不同程度的溶解痕迹);石英质岩屑(燧石及石英岩岩屑)沿岩屑内部组分间的溶蚀较强,甚至可以形成蜂窝状微孔隙;碳酸盐岩屑则常保存得较好,溶蚀程度也一般较轻微;碳酸盐胶结物以晚期碳酸盐胶结物含量很少为特征;石膏以及沸石类胶结物在储层中可以不同程度地出现;粘土矿物则随着碱性成岩作用程度的加深,逐渐变得以伊利石以及绿泥石等为主。

在碱性成岩作用下,储层中储集空间以石英溶解型次生孔隙的大量出现为特征,并且在储集空间的构成上具有非常重要的作用。碱性成岩作用下,早成岩 B 期以及晚成岩期可以成为次生孔隙的有利形成期,而且由于地层水性质的振荡性变化,储层孔隙的分布相对更为复杂。

1.3.6 碱性成岩作用的成因

碱性成岩环境的形成是沉积环境以及埋藏作用过程中水岩相互作用的结果。在如泌阳凹陷的碱性古湖盆沉积储层中,碱卤水以及碱层的存在所提供的碱性及强碱性环境为埋藏成岩过程中碱性成岩环境的形成和维持提供了良好的前提,是泌阳凹陷碱性成岩作用形成的最重要条件。而在如柯克亚地区的干旱气候下所形成的表生储层中,原始沉积物中有机质含量少以及表生成岩环境中由于强烈蒸发作用所造成的偏碱性及碱性环境,为碱性成岩作用的形成提供了有利条件,长期干旱气候环境所形成的巨厚地层以及石膏层,对从古生界和中生界上涌的酸性地层水起到了中和的作用,使得处于该套地层上部的层段经历的酸性地层水改造减弱,而总体处于碱性成岩环境中。

2 碎屑岩主要造岩组分特征及其在地层水中的稳定性

陆源碎屑岩在组分上主要由石英和长石、岩屑、云母及绿泥石碎片、粘土矿物以及胶结物等组成。根据成分和结构的不同,上述组分可以归入颗粒、杂基、胶结物等结构组分。不同类型结构组分其成分、特征及其在埋藏成岩作用过程中的稳定性也是不同的。陆源碎屑岩中的颗粒主要为石英、长石和岩屑,此外还有少量的云母及绿泥石碎片。

2.1 石英及长石颗粒的稳定性

2.1.1 石英

石英是岩浆岩和变质岩中最常见的造岩矿物之一,同时也是陆源碎屑岩中分布最广、含量最高的矿物。石英碎屑在形态上一般具有破碎及磨圆轮廓,并常保存原岩的某些特征,如波状消光、各种包裹体以及溶蚀或结晶的外形。石英碎屑主要出现于砂岩及粉砂岩中(平均含量达66.8%),在砾岩中含量较少,在粘土岩中则更少(姜在兴,2003)。

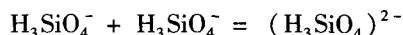
石英在酸性及中性的环境中是比较稳定的,但是在碱性溶液中,特别是pH值比较高的碱性溶液中,则比较容易溶解。

在实验室中一般不用玻璃瓶盛放碱性溶液,更不能玻璃瓶塞,如果被误装以后,玻璃瓶塞很难拔出来。原因是由于玻璃瓶以及玻璃瓶塞的主要成分是 SiO_2 , SiO_2 容易与碱性溶液发生作用生成硅酸钠凝胶。

在地下成岩环境中,这种硅酸钠凝胶的浓度不会达到这么高,因为它处于一个动态的环境中,它可以随着地下流体的运移而移动,造成局部地方产生次生孔隙或者发生胶结,最终使孔隙带发生重新组合。其化学形式为:



但是当液体介质的碱度比较高($\text{pH} > 11$)或者硅元素的含量较高的时候,就会形成硅酸的二聚物或三聚物的聚体离子或离子团,并发生迁移:



石英在成岩过程中的溶解,主要与溶液的pH值有关,在正常的温度和pH值 < 9 的情况下,表生水中的二氧化硅一般以单分子正硅酸 H_4SiO_4 或 $\text{Si}(\text{OH})_4$ 的形式存在,即:



当溶液的pH值 > 9 的时候, $\text{Si}(\text{OH})_4$ 离解为 H_3SiO_4^- 和 $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$ 。在这种条件下溶解度有明显的增加(图2-1)。

当pH值增加到9.0~9.5以上的时候,溶液中的 SiO_2 总量急剧增加,当pH值为11

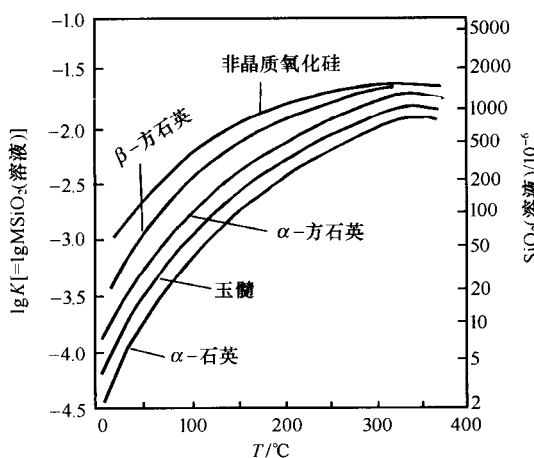


图 2-1 几种氧化硅矿物的溶解度与温度的关系
(Loretta, et al., 1985, 转引自刘宝珺, 1992)

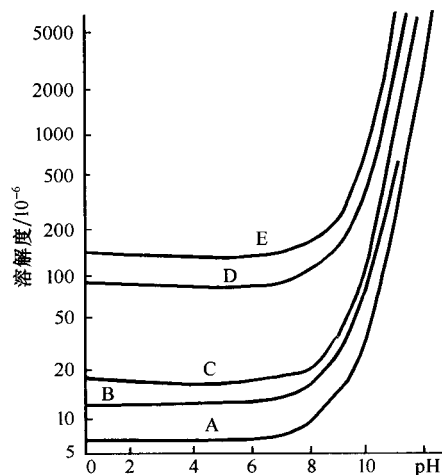


图 2-2 二氧化硅的溶解度与 pH 值的关系
(Muurok, 1974, 转引自刘宝珺, 1992)

的时候，溶液中 SiO_2 的浓度可高达 5000×10^{-6} 。从图 2-2 中还可以看出当 pH 值 < 8 的时候，其溶解度很低，溶解速度也很慢，而且几乎不会随着 pH 值继续变小而发生变化，这主要是硅酸不离解的缘故。

氧化硅的溶解度还与结晶程度、温度和压力有关。在室温下非晶质氧化硅的浓度为 $(100 \sim 140) \times 10^{-6}$ ，而石英的浓度仅为非晶质氧化硅的 5%，大约为 $(6 \sim 10) \times 10^{-6}$ 。从图 2-1 中可以看出随着温度的升高，石英溶解度的增加比非晶质氧化硅的溶解度的增加明显要快，石英与非晶质氧化硅的溶解度曲线，在高温的时候比较接近，在温度接近 0°C 的时候，两者则相差较大。但是无论在高温下还是在低温下，结晶质石英的溶解度都小于非晶质氧化硅，加上石英的内能低于非晶质氧化硅，因此在实验室溶液以及地层水环境中，石英都是相对稳定的形式，它比非晶质氧化硅更容易发生沉淀，低温时更是如此。

2.1.2 长石

长石是陆源碎屑岩中含量上仅次于石英的颗粒组分，据统计，砂岩中长石平均含量为 10% ~ 15%。长石的类型常见有微斜长石、正长石和中一酸性斜长石等。由于各种长石矿物的稳定性以及母岩等的差别，一般认为碎屑岩中钾长石多于斜长石，在钾长石中，正长石略多于微斜长石，在斜长石中，钠长石则远远多于钙长石（姜在兴，2003）。碎屑岩中长石同样具有破碎磨蚀的外形，但是不同类型长石，其表面特征是不同的。在长石中，最新鲜的是微斜长石，其颗粒表面光洁，格子状双晶清晰可见；通常，正长石的高岭石化较强，使得其表面常呈现云雾状，镜下显得较混浊；酸性斜长石常有清晰的聚片双晶，有时蚀变以及绢云母化可以较强，其表面也常较混浊，有时呈现模糊轮廓。

在自然界，长石的稳定性低于石英，在埋藏成岩条件下，长石变化主要有溶解和向高岭石等粘土矿物转化等两个趋势。由于长石是碎屑岩中主要的颗粒组分之一，长石的溶解和转化对储层的形成和演化具有非常重要的意义。影响长石溶解或转化的因素是多方面

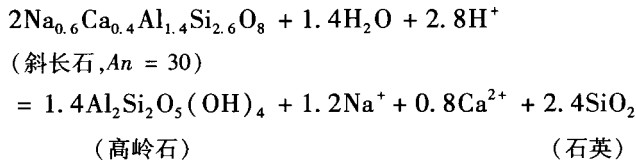
的,包括长石的成分、结构、反应的温度、流体 pH 值及其中有机酸的类型和含量等(史基安,1994)。在上述因素中反应温度、pH 值及有机酸类型等是最主要的影响因素。

2.1.2.1 温度的影响

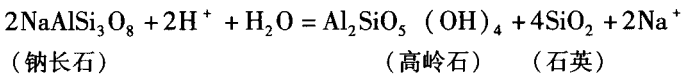
埋藏成岩作用过程是一个随埋深增加而发生温度渐进式增加的过程,温度的改变对长石的溶解和次生孔隙的形成具有非常重要的意义。

自然界长石有三个常见端员:钙长石、钠长石和钾长石,在长石的溶解过程中,最常见的反应是形成自生高岭石。史基安(1994)对长石的高岭石化现象进行过热力学计算,并计算出了斜长石(更长石)、钠长石和钾长石在标准状态下的反应自由能(ΔG^0)、生成热(ΔH^0)和熵(ΔS^0):

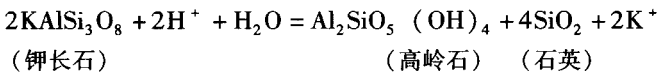
对于斜长石(更长石)来说,其反应的方程式为



$$\Delta G^0 = -162.81 \text{ kJ/mol}, \Delta H^0 = -192.72 \text{ kJ/mol}, \Delta S^0 = -100.5 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$$



$$\Delta G^0 = -78.74 \text{ kJ/mol}, \Delta H^0 = -87.38 \text{ kJ/mol}, \Delta S^0 = -30.04 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$$



$$\Delta G^0 = -67.70 \text{ kJ/mol}; \Delta H^0 = -45.97 \text{ kJ/mol}; \Delta S^0 = -72.91 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$$

($\Delta G^0 < 0$, 反应为不可逆过程; $\Delta G > 0$, 反应为不可能发生过程; $\Delta G = 0$, 反应为平衡态或可逆过程)

由上述热力学计算可以看出,如果不考虑长石颗粒在埋藏成岩过程中地层压力、pH 值、有机酸以及孔隙流体流动状况等因素的影响,在标准状态下无论斜长石还是钾长石都能自发的向高岭石转化,并且由于斜长石的反应自由能远小于钾长石,表明在地表条件下,斜长石比钾长石更容易发生蚀变和溶解。

在压力保持不变的条件下,随着温度的升高,反应自由能将发生变化,由公式

$$\Delta G_T^0 = \Delta H^0 - T\Delta S^0$$

可以计算出温度从 25℃ 升高到 175℃ 时,斜长石的 ΔG^0 由 -162.81 kJ/mol 升高到 -147.7 kJ/mol;钠长石的 ΔG 由 -78.74 kJ/mol 上升至 -73.93 kJ/mol;而钾长石则由 -67.70 kJ/mol 降低至 -78.64 kJ/mol。由此可知随着温度的升高,钙长石和钠长石的溶解影响不大或使其溶解速度有所降低,而钾长石的溶解能力则有较明显的提高(史基安,1994)。因而从理论上说,钾长石的溶解度对埋藏温度的变化相对较敏感,尽管如此,在埋藏成岩作用过程中钠长石和钾长石的溶蚀速度还是大致相近,而斜长石(更长石)则比钠长石和钾长石明显易溶蚀。

2.1.2.2 有机酸的影响

长石的溶解和有机酸的存在有着密切的关系。在盆地流体中,醋酸和草酸是常见的有

机酸类型，它们在盆地流体中具有较高浓度（醋酸质量百分比可高达 1%（Surdan, 1984），草酸可达 494×10^{-6} （Mac Gowan, 1988））和较高的热稳定性（醋酸在 150℃ 以下，草酸在 100℃ 以下能稳定存在于地质体中）（Palmer D A, 1986），因而有利于它们对长石矿物的溶蚀改造。正因为如此，有很多学者都对其进行过实验研究，多数学者的实验都表明草酸能显著提高长石的溶解度（Surdan, 1984；Mac Gowan, 1988；Palmer, 1986；Hajash, 1992；Franklin, 1994）。对于醋酸，情况也是如此，Hajash（1992）的研究表明在 100℃，pH 值为 4.7 左右时，醋酸根的存在可使铝的溶解量增加到一个数量级以上；Franklin（1994）等的实验表明浓度为 4×10^{-3} 左右的醋酸根能使钠长石溶解度增加约两倍。对于上述两种有机酸对长石的相对溶解能力来说，有实验表明，在 80℃、起始 pH 值为 4 的条件下，醋酸根的存在显著增加了铝的溶解量，但草酸根的存在并未导致长石溶解度的显著提高，其对长石溶解度的增加还不及醋酸（Mac Gowan, 1988），这在一定程度上说明醋酸对长石的溶蚀能力要比草酸强。

但是实际上，有机酸对长石溶解能力的差异并不是绝对的，它还受到其它因素（如溶液温度和酸度等）的影响。罗孝俊（2001）通过计算钾长石的溶解度的方法，把醋酸和草酸对长石溶解度的影响进行过理论计算，结果表明草酸、醋酸的络合作用对长石溶解度有影响，但强烈地受溶液酸度、温度的制约（图 2-3、图 2-4）。只在特定的酸度范围内，有机酸阴离子才能通过络合作用提高长石的溶解度。

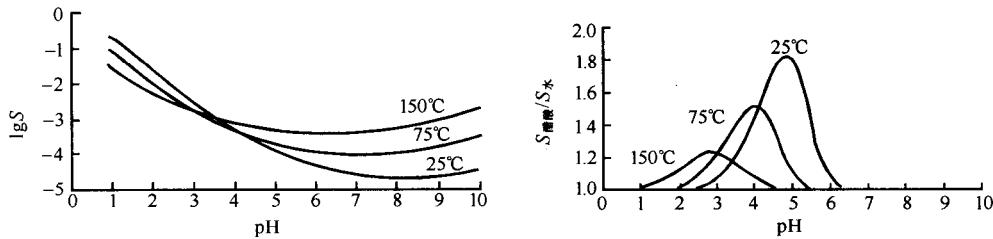


图 2-3 不同温度下，醋酸浓度为 0.05 mol/L 时钾长石的溶解度及其与无络合条件下的溶解度之比
（据罗孝俊，2001）

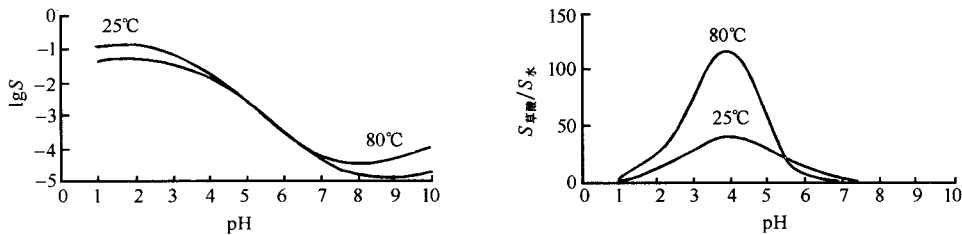


图 2-4 不同温度下，草酸浓度为 0.05 mol/L 时钾长石的溶解度及其与无络合条件下的溶解度之比
（据罗孝俊，2001）