

文章编号: 1000-0550(2007) 05-0701-07

成岩过程中的“耗水作用”及其石油地质意义

张善文

(中国石化股份胜利油田分公司 山东东营 257001)

摘要 受济阳拗陷古近系中深部储层出现异常低压的启示, 讨论了成岩过程中主要矿物蚀变的“耗水”问题, 并从理论上计算了这种蚀变的耗水量。初步研究表明, 成岩过程中矿物蚀变的“耗水作用”可使地层水大量减少, 在没有外部流体补充的情况下, 相应地层必然呈低压状态, 并与围岩形成一定的压力差, 易于烃类进入成藏。

关键词 成岩作用 “耗水作用” 蚀变 长石 高岭石

作者简介 张善文 1955 年出生 教授级高级工程师 石油地质 E-mail: dkyzsw@slof.com

中图分类号 P618.13Q.1 TE122.2 文献标识码 A

自 1893 年 J. W. Ather 首先提出成岩作用的概念后, 人们对成岩作用的研究不断系统和深入。在国外, 成岩作用的研究已取得了较大进展, 近年来国内也有很多学者从事这方面的研究, 并取得较多成果。随着油气勘探开发深度、精度和难度的增加, 人们开始系统总结成岩作用的一般规律, 据此预测有利孔隙发育带、帮助寻找隐蔽油气藏, 并逐步与测井、物探相结合, 使成岩作用研究在油气勘探开发中发挥更大作用。

众所周知, 沉积岩中含有大量地层水。它以不同的形式与油气共存于地下岩石孔隙中, 是油气运移的驱动力和载体。它和油气之间存在着经常性的物质成分交换, 其运动规律与油气藏的形成、保存和破坏有着十分密切的联系。纵观国内外相关资料, 地层水的研究主要集中在水化学(水型、矿化度、 $\sqrt{\text{Na}}/\sqrt{\text{Cl}}$ 系数、 $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ 系数、微量元素等)、水岩相互作用、溶解作用(长石颗粒、碳酸盐胶结物、高岭石和蒙脱石的溶解等)、沉淀作用(SiO_2 、碳酸盐、粘土矿物及其他矿物的沉淀作用)、水动力及其与油气聚集成藏的关系方面^[1~11]。地质家在研究地层水的过程中, 往往注重了成岩作用与次生孔隙带的发育, 却忽略了一个问题——成岩过程中因水的消耗引起的地层流体体积变化及其对油气成藏的影响。在济阳拗陷古近系油气勘探的实践中, 至少有两种现象与其有关: 一是某些油气藏特别是深部储集层往往不含水, 表现为“非油即干”; 二是中深部储集层常常出现异常低压。笔者将根据这些现象探讨成岩演化阶段矿物转化过程中地层水的消耗及其石油地质意义。

1 成岩过程中的“耗水作用”

1.1 成岩过程中的早期排水

传统的地质学认为陆源碎屑沉积物沉积后首先受到的是上覆水层或沉积层的压实作用, 最突出的表现是沉积物排水、脱水和体积缩小。新的沉积物含水量可达 70% ~ 90%, 压实后含水量减少。当埋深超过 300 m 时, 75% 以上的水已经排出^[12]。在正常压实条件下, 当沉积岩埋深到一定深度、上覆岩层中出现具备区域盖层条件的岩层后, 其中的地层水与地表流体系统不再连通。只有在出现重大地质事件(如构造运动)时, 深处的地层水才会有机会再次排泄。

1.2 成岩过程中的矿物蚀变

除上述排水现象外, 笔者提出另一种使地层水减少的概念——成岩过程中的“耗水作用”。为此, 我们先讨论成岩过程中人们都熟悉的矿物蚀变问题。

一般的成岩作用可划分为早成岩和晚成岩两个阶段: 早成岩阶段包括 A、B 两个成岩期; 晚成岩阶段有 A、B、C 3 个成岩期, 但是也主要表现为 A、B 两期的特征。每个成岩期次都会发生不同的演化过程, 并由此构成不同的成岩演化序列(图 1)^[13, 14]。

1.2.1 早成岩阶段

济阳拗陷古近系早成岩阶段一般发生在埋深小于 2 200 m 的深度。这一阶段地层水系统处于开启状态, 压实使大量水排出, 岩石体积缩小、孔隙度降低。蒙脱石(济阳拗陷多为混层比大于 85% 的伊蒙混层)的层间水排出后进入地层孔隙中, 与开启水系统混合。此阶段岩石多遭受浅蚀变作用, 蚀变程度以

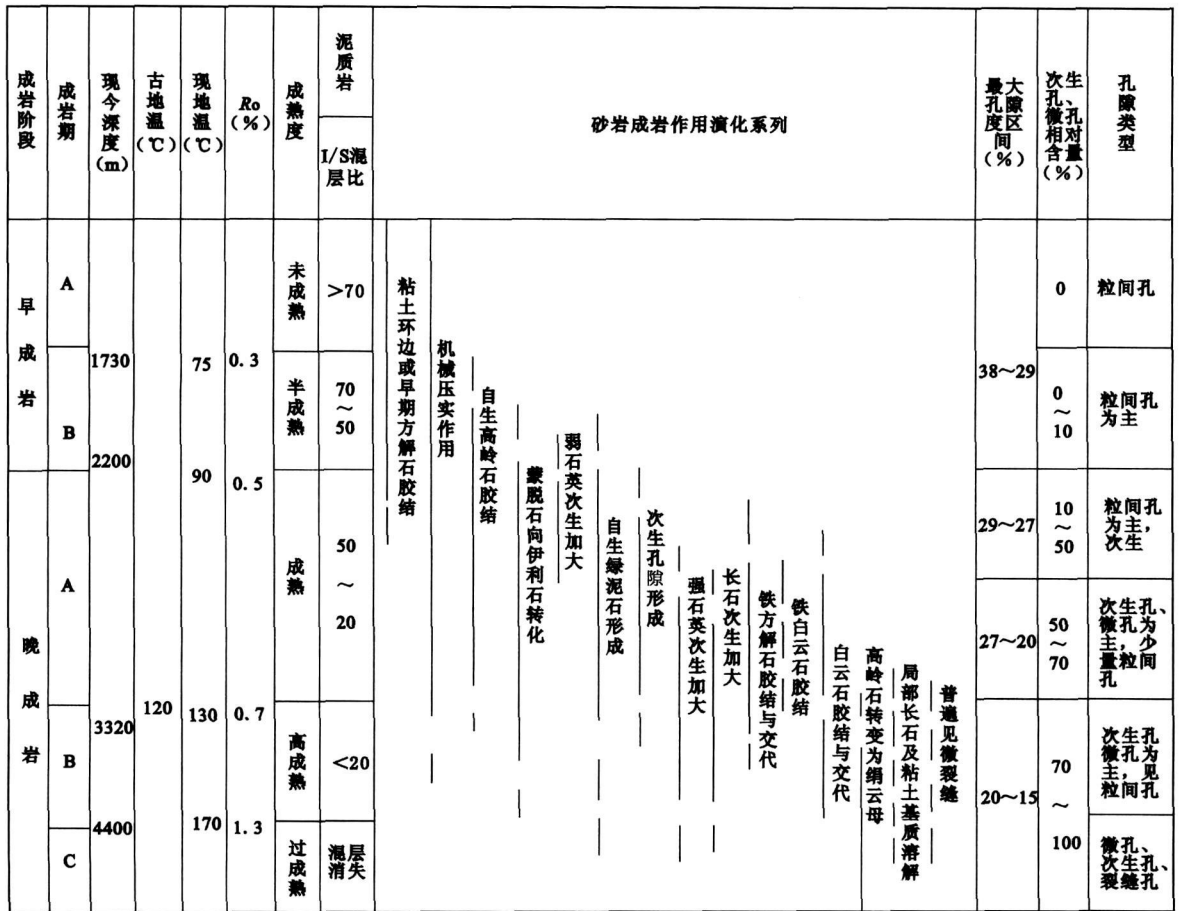


图 1 济阳拗陷古近系成岩阶段划分及成岩演化序列图示

Fig. 1 Divisions of diagenetic stage and diagenetic evolution series of Paleogene in Jiyang Depression

3% ~ 8% 居多^[15], 且基本发生在钾、斜长石和火山岩屑表层。蚀变产物 (伊利石化粘土矿物为主) 总量约占 3.5%, 与层间挤出水相比, 该阶段蚀变的耗水量可以忽略。

1.2.2 晚成岩阶段

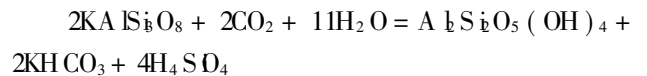
济阳拗陷古近系晚成岩阶段 A 期一般发生在埋深 2 200~ 3 300 m 深度: 镜质体反射率为 0.5% ~ 0.7%, 烃源岩进入成熟阶段, 油气大量生成^[16]; 岩石蚀变作用普遍发生。统计表明, 该阶段岩石蚀变达到中度 (12% 左右), 以高岭石为主的蚀变产物超过了蚀变产物总量的 5% (图 2)。

济阳拗陷古近系晚成岩阶段 B、C 期一般发生在埋深大于 3 300 m 深度: 镜质体反射率大于 0.7%, 烃源岩进入高成熟、过成熟阶段^[16]; 蒙脱石或高岭石的伊利石化造成矿物中结晶水的析出。结晶水进一步增强了地层水的饱和状态, 与“耗水作用”形成了明显的负效应。但值得注意的是, 这种伊利石化 (埋深一般大于 3 300 m) 多发生在主成藏期之后。

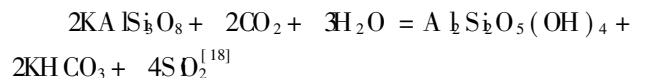
1.3 成岩过程中的矿物耗水

由图 1 可以看出, 矿物蚀变主要发生在晚成岩阶段 A 期, 主要的蚀变过程有矿物的高岭石化和绿泥石化。以下给出该时期几种主要矿物蚀变的方程式, 其中可见其耗水量。

(1) 钾长石蚀变为高岭石



考虑到 H_4SiO_4 在埋深约 1 900 m 时生成自生石英, 释放一部分水 ($\text{H}_4\text{SiO}_4 = \text{H}_2\text{SiO}_3 + \text{H}_2\text{O}$, $\text{H}_2\text{SiO}_3 (150^\circ\text{C}) = \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O}$), 上述反应式变为



计算可得, 1 000 g 钾长石蚀变为高岭石需要 97.1 g 水。

(2) 钠长石蚀变为高岭石

同样考虑 H_4SiO_4 生成自生石英的问题, 钠长石蚀变为高岭石的方程式为

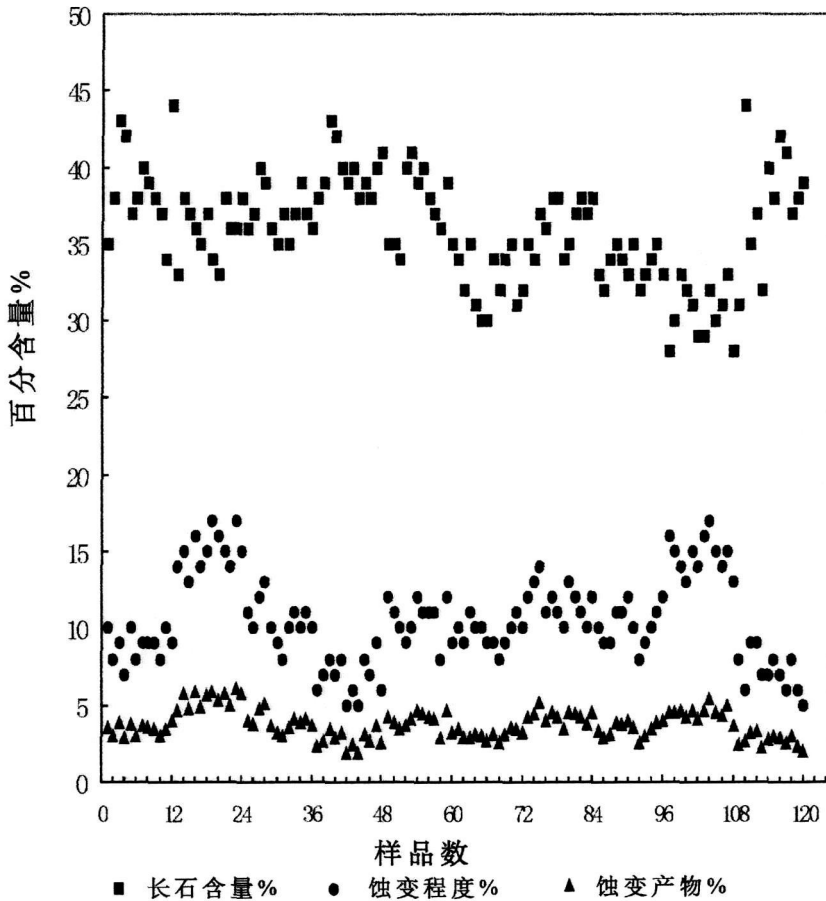
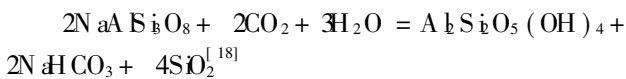


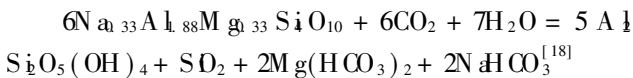
图 2 岩石中长石、长石蚀变程度及其蚀变物趋势图

Fig 2 Trend map of feldspar alteration degree and alteration matter in rock



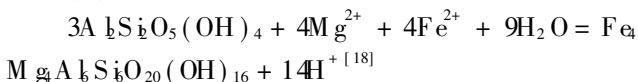
计算可得, 1 000 g 钠长石蚀变为高岭石需要 103.1 g 水。

(3) 蒙脱石高岭石化



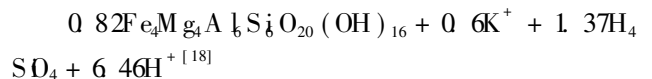
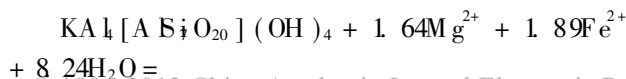
计算可得, 1 000 g 蒙脱石的高岭石化需要 62 g 水。

(4) 高岭石绿泥石化



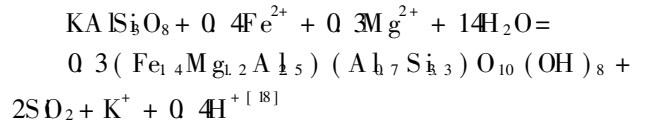
计算可得, 1 000 g 高岭石的绿泥石化需要 209 g 水。

(5) 伊利石绿泥石化



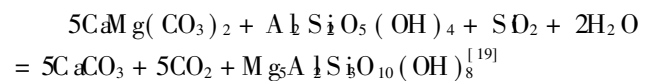
计算可得, 1 000 g 伊利石的绿泥石化需要 195 g 水。

(6) 钾长石绿泥石化



计算可得, 1 000 g 钾长石的绿泥石化需要 906 g 水。

(7) 白云石、高岭石向方解石、绿泥石转化



计算可得, 在此转化过程中 1 000 g 高岭石需要 139 g 水。

从以上反应式和计算结果可以看出, 成岩过程中很多矿物的蚀变需要水的参与, 并由此造成岩石格架

中的地层水减少。我们把成岩过程中一切由矿物蚀变使地层含水量减少的作用统称为“耗水作用”。以下将进一步分析这种作用耗水的量。

2 矿物蚀变耗水量与体积变化

2.1 耗水量分析

2.1.1 单位体积储集层的耗水量

在济阳拗陷古近系储集层的矿物组成中,有些矿物,如高岭石、钾长石、伊利石等单位体积的绿泥石化耗水比例较大,但因其含量甚微^[13 14 16],总耗水量也不大。储集层中主要的矿物是长石,其含量为28%~45%,平均36.1%。古近系主要矿物蚀变阶段(晚成岩阶段A期)长石的蚀变程度为7%~15%,平均12%。根据上述化学反应式(钠长石的密度取2.57 g/cm³,钾长石的密度取2.56 g/cm³,水的密度为1.0 g/cm³),我们可以计算出每立方米储集层中长石蚀变为高岭石所消耗的地层水量

$1 \times 10^6 \text{ m}^3 \times 36.1\% \times 12\% \times 2.56 \text{ g/cm}^3 \times 97.1 \times 10^{-3} = 10768 \text{ g} = 10768 \times 10^{-6} \text{ t}$ (假定长石全为钾长石)

或

$1 \times 10^6 \text{ m}^3 \times 36.1\% \times 12\% \times 2.57 \text{ g/cm}^3 \times$

$103 \times 10^{-3} = 11478 \text{ g} = 11478 \times 10^{-6} \text{ t}$ (假定长石全为钠长石)

平均

$(10768 \times 10^{-6} \text{ t} + 11478 \times 10^{-6} \text{ t}) / 2 = 11123 \times 10^{-6} \text{ t}$

2.1.2 储集层总的耗水量

以东营凹陷为例,计算晚成岩阶段A期(一般埋深为2200~3300 m)矿物蚀变的总消耗水量。对全区范围内2237口探井进行了统计,勾绘出了古近系埋深2200~3300 m深度段对应的储集层等厚图(图3),用面积权衡法计算的储集层体积为 $7.305 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 。由此可得到该深度段储集层的总“耗水”量为

$7.305 \times 10^{11} \text{ m}^3 \times 11123 \times 10^{-6} \text{ t/m}^3 = 81.25 \times 10^8 \text{ t}$

至此,不得不承认,成岩过程中的耗水量是巨大的,至少在济阳拗陷古近系是如此。

2.2 矿物体积的变化

我们已经看到了在长石矿物蚀变为高岭石的过程中岩石格架中的地层水大量减少,还应该注意这些矿物的蚀变与转化可使其体积发生相应变化。表1、表2给出了这种变化的初步分析结果。

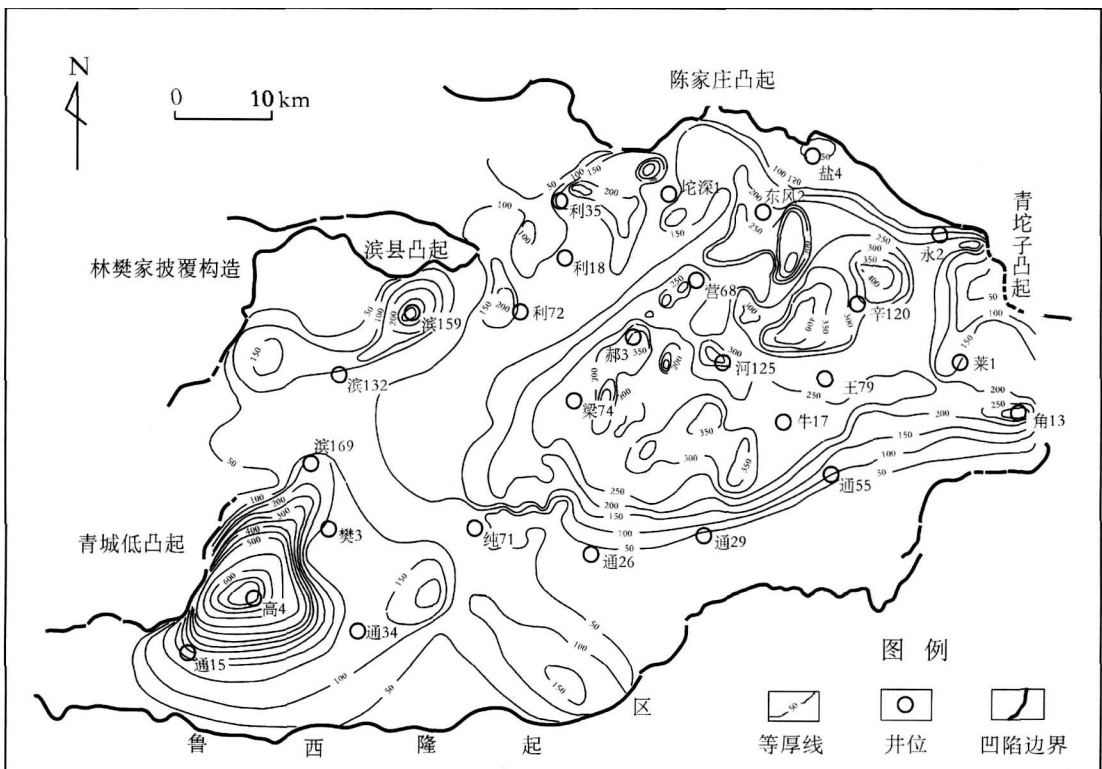


图3 东营凹陷古近系2200~3300 m深度段储集层厚度等值线图(m)

Fig. 3. Contour map of reservoir thickness in 2200~3300 m of Paleogene in Dongying sag.

表 1 钾长石蚀变为高岭石的体积变化情况

Table 1 Volume changes of potassium feldspar altering to kaolinite

反应阶段	反应前			反应后	
反应物质	$2\text{KAlSi}_3\text{O}_8$	$2\text{H}_2\text{CO}_3$	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	2KHCO_3	4SiO_2
摩尔数	2	2	1	2	4
摩尔克数 /g	278×2	62×2	258	100×2	60×4
密度 /(g/cm^3)	2.56	1.05	2.6	2.17	2.6
体积 / cm^3	217.2	118.1	99.2	92.2	92.3
反应前后体积 / cm^3	335.3	283.7			

表 2 钠长石蚀变高岭石的体积变化情况

Table 2 Volume changes of albite altering into kaolinite

反应阶段	反应前			反应后	
反应物质	$2\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	$2\text{H}_2\text{CO}_3$	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	2NaHCO_3	4SiO_2
摩尔数	2	2	1	2	4
摩尔克数 /g	262×2	62×2	258	84×2	60×4
密度 /(g/cm^3)	2.57	1.05	2.6	2.19	2.6
体积 / cm^3	203.9	118.1	99.2	76.7	92.3
反应前后体积 / cm^3	322.0	268.2			

由表 1 可以看出,钾长石蚀变为高岭石后,体积缩小率为 $(335.3 - 283.7) / 335.3 \times 100\% = 15.4\%$ 。

由表 2 可以看出,钠长石蚀变为高岭石后,体积缩小率为 $(322.0 - 268.2) / 322.0 \times 100\% = 19.8\%$ 。

我们有理由认为,在其他条件不变的条件下,长石蚀变为高岭石必然导致储集层孔隙度增加。

3 “耗水作用”的石油地质意义

3.1 有利于油气聚集成藏

以上各类计算虽然是不完全的,但足以证明在主生烃期矿物的耗水量是相当可观的。特别是在封闭体系条件下,庞大的耗水量使岩层中的孔隙可能是“空”的,在没有或没有足够外部流体补充的情况下,这些“空”孔隙的集中带将出现压力低,在钻井测试过程中表现为负的地层压力系数。济阳拗陷勘探中常见该类现象(表 3)。

另一方面,岩层中这种低压区的出现,必然与外部形成一定的压力差,这可能就是油气进入储集层的动力。在封闭体系(流体封存箱)内,压力差的存在可使烃源岩排出的烃类直接进入储层;即使不封闭的体系,低压区与周围也有一定的压差,当有油气于其周围运移时,很容易进入岩层的“空”间而形成油气藏——充注的油气量不足时也表现为低压(表 4)。

很容易理解,当油气(或其他流体)充注适量时储层表现为常压,而充注过量时储层表现为异常高压。

3.2 其他地质意义

(1) 深层次生孔隙发育带与矿物的耗水作用紧密相关。

(2) 耗水量的大小与油气充注的强弱将引起油气藏饱和度的变化。

(3) 矿物蚀变造成的体积变化必然改变储集层的孔隙结构,矿物性质的变化必然引起储集层润湿性的变化。

(4) 有些矿物的蚀变产生 H^+ , 这可能会影响烃类的演化。

表 3 济阳拗陷部分储层低压数据统计表

(试油不出液,见油花)

Table 3 Statistics of low pressure data from some reservoirs Jiyang Depression (test no liquid, only oil bloom)

凹陷	井号	层位	测压点深度 /m	压力系数
东营	利 72	E_{s3}	3 284.20	0.86
	利 911	E_{s4}	3 242.65	0.88
	梁 70	E_{s3}	3 273.10	0.87
	牛 11	E_{s4}	3 719.00	0.64
	王斜 133	E_k	3 266.25	0.89
	义 138	E_{s3}	2 913.50	0.85
沾化	老 9	E_{s4}	3 524.40	0.81
	孤南 135	E_{s3}	3 501.85	0.78
	义 7	E_{s3}	3 116.60	0.63
	桩古 43	E_{s1}	3 207.00	0.90
车镇	车 40	E_{s4}	3 360.40	0.72
	车 22	E_{s4}	3 297.05	0.75
惠民	商 55	$E_{s3}^{\text{上}}$	2 907.10	0.56
	商 741	$E_{s3}^{\text{中}}$	3 269.30	0.80

表4 济阳拗陷部分储层低压数据统计表(试油出油)

Table 4 Statistics of bw pressure data from some reservoirs Jiyang Depression (test oil)

凹陷	井号	层位	测压点深度 /m	压力系数
东营	坨 711	E ₅ ^下	3 125 35	0.85
	营斜 543	E ₅ ^中	3 049 35	0.84
	永 554	E ₅ ₄	3 405 00	0.66
	樊 113	E ₅ ^中	3 345 05	0.87
	梁 64	E ₅ ₃	3 311 20	0.86
	义 97	E ₅ ₃	2 985 95	0.78
	桩 59	E ₅ ^下	3 502 00	0.62
	孤南 154	E ₅ ₂	2 992 30	0.86
	孤东 551	E ₅ ₃	3 038 40	0.89
	孤南 132	E ₅ ₃	3 702 9	0.89
沾化	罗 7	E ₅ ₄	3 042 00	0.89
	义 134	E ₅ ₃	2 982 65	0.89
	义东 24	E ₅ ₂	2 900 50	0.79
	桩 397	E ₅ ^上	3 167 80	0.89
	桩 65	E ₅ ₄	3 018 80	0.79
	桩 78	E ₅ ^下	3 253 45	0.89
	桩古 38	E ₅ ₂	3 049 80	0.79
	桩斜 22	E ₅ ^上	2 950 00	0.82
	桩斜 471	E ₅ ₁	2 818 45	0.77
	车镇	大 56	E ₅ ₂	3 234 75
大 67		E ₅ ₂	3 098 40	0.84
商 543		E ₅ ^中	3 234 50	0.65
商 848		E ₅ ^中	2 802 55	0.87
惠民	商 852	E ₅ ^中	2 953 50	0.90
	田 12	E ₅ ^中	2 983 20	0.85
	田 27	E ₅ ^上	3 051 60	0.89
	临 59	E ₅ ^上	2 962 20	0.67

4 结语

前人对地层水的大量研究工作无疑对石油勘探开发作出了重要贡献。笔者提出一直被忽视了“耗水作用”，希望能引起人们的重视。“耗水作用”如果是普遍现象，我们是否应该重新认识油气成藏的问题？

参考文献 (References)

- 1 代金友, 张一伟, 熊琦华, 等. 成岩作用对储集层物性贡献比率研究. 石油勘探与开发, 2003 30(4): 42-45 [Dai Jinyou, Zhang Yivei, Xiong Qihua *et al*. Effects of diagenesis on reservoir property: a case study of the Cainan Oilfield in east of Junggar Basin. Petroleum Exploration and Development 2003 30(4): 42-45]
- 2 赵澄林, 张善文, 袁静. 胜利油区沉积储层与油气. 北京: 石油工业出版社, 1999 [Zhao Chenglin, Zhang Shanwen, Yuan Jing. Sedimentary Reservoir and Oil and Gas in Shengli Oilfield. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999]

- 3 黄福堂, 谭伟, 冯子辉. 松辽盆地北部地层水的物理化学性质和特征. 大庆石油地质与开发, 1997, 16(3): 22-25 [Huang Futang, Tan Wei, Feng Zihui. Physical and chemical property and feature of formation water in the north of Songliao basin. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing 1997, 16(3): 22-25]
- 4 程晓玲. 粘土矿物成岩作用对油气储集性和产能的影响——以苏北盆地台兴油田阜三段储层为例. 石油实验地质, 2003 25(2): 164-169 [Cheng Xiaoling. Influence of the diagenesis of clay minerals on reservoirs and productivity: a case study on the fu-3 reservoirs of Taixin oilfield, the north Jiangsu basin. Petroleum Geology & Experiment 2003 25(2): 164-169]
- 5 郑茂凌, 庞明. 碎屑储集岩的成岩作用研究. 武汉: 中国地质大学出版社, 1989 69-117 [Zheng Maoling, Pang Ming. Diagenesis of Clastic Sedimentary Rock. Wuhan: The University of Geology Press, 1989 69-117]
- 6 Ebougue V W, Jendrykowski N, Pineau F, *et al*. Uses of CHRSA (Chlorine Residual Salt Analysis): a new technique for the investigation of waters from cores. AAPG International Conference (Paris, France, 9/11~14/2005) Proceedings 2005
- 7 Mclellan S, Hutcheon J, Krouse H R. Hydrological controls on diagenesis in the Bow Island Formation, Alberta, Canada. Annual AAPG-SEPM-EMD-DPA-DEG Conv. (Houston 3/5~8/95) Pap. Abstr. 64A, 1995
- 8 Knut Bjørlykke 等. 北海盆地和墨西哥湾沿岸盆地地层水分析对储集岩中石英、长石及伊利石沉淀作用的地球化学约束. 谢渊译, 章立生校. 石油勘探与开发, 1998, 21(4): 62-76 [Knut Bjørlykke *et al*. eds. Geochemical restriction of Formation water analysis to precipitation of quartz, feldspar, goethite in sedimentary rock in北海 basin and Mexico basin. Translated by Xie Yuan. Petroleum Exploration and Development 1998 21(4): 62-76]
- 9 Margai Z. Hydrogeological characterization of the Red River Formation, Williston Basin, Canada-USA. M.Sc. Thesis 2002. Masters Abstract 2004 42(1): 188
- 10 Rostron B J, Khan D K, Margai Z. Hydrodynamics and petroleum migration in the Red River Formation, Williston Basin, Canada and U. S. A. Annual AAPG Convention (Calgary, Alberta 6/19~22/2005) Abstracts Volume A12Q 2005
- 11 Stefan Bachu. Flow system in the Alberta Basin: patterns, types and driving mechanisms. Bulletin of Canadian Petroleum Geology 1999, 47(4): 455-474
- 12 曾允孚. 沉积岩石学. 北京: 地质出版社, 1986 [Zeng Yunfu. Sedimentary Petrology. Beijing: Geological Publishing House, 1986]
- 13 蔡进功, 谢忠怀, 田芳, 等. 济阳拗陷深层砂岩成岩作用及孔隙演化. 石油与天然气地质, 2002, 23(1): 84-89 [Cai Jingong, Xie Zhonghui, Tian Fang *et al*. Diagenesis and pore evolution of deep sandstone reservoir in Jiyang depression. Petroleum and Gas Geology, 2002 23(1): 84-89]
- 14 周自立, 吕正谋. 山东胜利油田第三系碎屑岩埋藏成岩作用与储层评价的关系. 地球科学, 1987, 12(3): 311-318 [Zhou Zhili, Lu Zhengmou. Relationship between the diagenesis of clastic rock and reservoir evaluation. Earth Science 1987, 12(3): 311-318]

- 15 钱峥, 李跃. 济阳坳陷深层砂岩储层成岩作用及其阶段划分. 石油大学学报, 1996, 2: 64-73 [Qian Zheng, Li Yue. Diagenesis of deep sandstone reservoir and the stage division in Jiyang depression. Journal of the University of Petroleum, China, 1996, 20(2): 64-73]
- 16 王秉海, 钱凯. 胜利油区地质研究与勘探实践. 山东东营: 石油大学出版社, 1992 [Wang Binghai, Qian Kai. Geology Research and Exploration Practice in the Shengli Oilfield. Dongying Shandong: The Petroleum University Press, 1992]
- 17 王行信, 周书欣. 砂岩储层粘土矿物与油层保护. 北京: 地质出版社, 1992 [Wang Xingxin, Zhou Shuxin. Clay Minerals in Sandstone and Reservoir Protection. Beijing: Geological Publishing House, 1992]
- 18 刘孟慧, 赵徵林. 碎屑岩储层成岩演化模式. 山东东营: 石油大学出版社, 1993 [Liu Menghui, Zhao Chenglin. Diagenetic Evolution Mode of Clastic Rock. Dongying Shandong: The Petroleum University Press, 1993]

“Water Consumption” in Diagenetic Stage and Its Petroleum Geological Significance

ZHANG Shan-wen

(Shengli Oilfield Branch Corporation, SINOPEC, Dongying Shandong 257001)

Abstract Inspired from anomaly low pressure in the middle and deep reservoir of Paleogene in Jiyang Depression, "water consumption" of main mineral alteration during diagenetic stage is discussed theoretically. Preliminary research result shows that "water consumption" of mineral alteration in diagenetic stage can make formation water greatly decrease. Relevant formation must be in the stage of low pressure without supply of exterior liquid. Pressure differences between relevant formation and wall rock make hydrocarbons emplace easily to form the effective reservoir.

Key words diagenetic function, "water consumption" function, alteration, feldspar and kaolinite