

大气水在碎屑岩次生孔隙形成中的作用 ——以鄂尔多斯盆地三叠系延长组为例

黄思静, 武文慧, 刘洁, 沈立成, 黄成刚

(成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川成都 610059)

摘要: 鄂尔多斯盆地三叠系延长组砂岩储层分布于印支期不整合面之下, 次生孔隙是最主要的石油储集空间。在大量薄片研究及资料统计的基础上, 从岩石物性、长石溶蚀形成的次生孔隙、高岭石和长石含量纵向变化等证据出发, 认为延长组砂岩储层次生孔隙的形成机制与印支期暴露时间间隔中大气水的溶解作用有关, 而不是埋藏成岩过程中有机酸溶解作用的结果, 同时人们也应对鄂尔多斯盆地延长组碎屑岩储层质量预测模式作必要更改。

关键词: 鄂尔多斯盆地; 三叠系延长组; 碎屑岩储层; 次生孔隙; 大气淡水。

中图分类号: P618.130 文献标识码: A

文章编号: 1000—2383(2003)04—0419—06

作者简介: 黄思静(1949—), 男, 教授, 1982 年毕业于武汉地质学院沉积岩石学专业, 获理学硕士学位, 现主要从事沉积学和石油地质学的教学与科研工作。

碎屑岩储层次生孔隙的成因是近年来地学界关注的重要问题之一。20 世纪 70 年代以来, 砂岩储层及相应成岩作用研究的最重要突破是在砂岩中发现了大量次生孔隙。现已证实至少有 1/3 的砂岩油气储集空间是在成岩过程中形成的。国内外地质学家对此做了大量的工作, 包括在实验室的模拟和在油田勘探实践中提出的许多新观点。Surdam 等^[1,2] 在 20 世纪 80 年代从有机—无机相互作用的角度研究了储层成岩作用和次生孔隙的形成与演化, 其成果对次生孔隙形成机理和有关理论产生了巨大的影响。

20 世纪 80—90 年代, 人们普遍认为有机酸在地下岩石孔隙形成过程中具有巨大的作用^[1~4], 其原因有 3 个: (1) 沉积盆地中有机质热演化过程因其脱羧基作用而有大量的有机酸生成, 其形成时间主要在液态烃形成前夕; (2) 与碳酸等其他溶解介质相比, 有机酸对各种矿物都有着更强的溶解能力^[5]; (3) 有机酸阴离子可以络合并迁移铝硅酸盐中的阳离子, 从而解决了埋藏条件下, 铝的溶解度极低和难于迁移的问题。大量铝硅酸盐矿物溶解的理想温度是 80~120 °C^[2,4], 大致相当于国内对含油气盆地成

岩阶段划分中的早成岩晚期到晚成岩早期。然而, 一些研究对有机酸在孔隙形成中的作用也提出过疑问^[3,6,7], 如 Bjørlykke 等^[6] 1992 年的研究发现, 由长石溶解形成次生孔隙的过程有些发生在较浅的地层中, 同时远离产生有机酸的烃源岩。Hayes 等^[3] 1992 年对美国 San Joaquin 盆地的 Stevens 浊积岩的研究也发现, 尽管在长石溶解的同时也存在有机酸, 但铝的含量或与有机酸阴离子的含量无关, 或与长石的溶解体积无关, 铝的含量比 Surdam 等^[1] 和 MacGowan 等^[8] 实验中所预计的要低 2 到 3 个数量级; 同时长石溶解的体积(平均体积 $(0.9 \pm 0.6)\%$)基本上被与之伴随的高岭石的沉淀体积(平均体积 $0.7\% \pm 0.5\%$)所抵消。

20 世纪 90 年代以来, 人们开始注意到开放体系中大气水对砂岩骨架颗粒溶解产生次生孔隙的现象, 如美国 San Joaquin 盆地处于大气水作用带的 Vedder 砂岩中, 长石溶解形成的孔隙体积显著大于沉淀高岭石的体积(分别是 $1.1\% \pm 0.7\%$ 和 $0.3\% \pm 0.4\%$)^[3], Emery 等^[9]、Ramm^[10]、Bloch 等^[11] 也注意到了近地表暴露和淡水淋滤作用对砂岩物理性质的影响, 他们认为, 深埋地层中孔隙增加现象的存在并不能证明孔隙的产生和铝的迁移就是在深埋地层中发生的, 孔隙的产生和铝的迁移可能

表 1 鄂尔多斯盆地三叠系延长组地层的划分

Table 1 Stratigraphic classification of Triassic, Ordos basin

| 地层 | | | | 厚度 范围/m | 岩性特征 |
|-----|---------|-----|---------|------------|--|
| 系 | 组 | 段 | 油层组 | | |
| 侏罗系 | 延安组或富县组 | | | | |
| 三叠系 | 延长组 | 第五段 | 长 1 | 0~240 | 暗色泥岩、泥质粉砂岩、粉—细砂岩、砂岩的不等厚互层, 夹炭质泥岩及煤线, 常因剥蚀而缺失 |
| | | 第四段 | 长 2 | 0~150 | 灰绿色块状细砂岩夹暗色泥岩, 可因剥蚀而缺失 |
| | | 长 3 | 120~150 | | 浅灰、灰褐色细砂岩夹暗色泥岩 |
| | | 第三段 | 长 4+5 | 80~110 | 浅灰色粉—细砂岩与暗色泥质互层 |
| | | | 长 6 | 100~130 | 褐灰色块状细砂岩, 粉—细砂岩, 泥质粉砂岩, 灰色或暗色泥岩, 夹薄层凝灰岩 |
| | | | 长 7 | 80~100 | 暗色泥岩, 炭质泥岩、油页岩夹薄层粉、细砂岩 |
| | | 第二段 | 长 8 | 70~85 | 暗色泥岩、砂质泥岩夹灰色粉细砂岩 |
| | | | 长 9 | 90~120 | 暗色泥岩、页岩夹灰色粉细砂岩 |
| | | 第一段 | 长 10 | 50~300 | 暗色厚层块状中—细砂岩, 极细砂岩, 底部为粗砂岩 |
| | | 纸坊组 | | | 灰紫色泥岩、砂质泥与紫红色中、细砂岩互层 |

根据长庆油田石油地质志编写组^[12]的资料整理, 虚线表示不整合关系。

发生在大气水作用带, 在以后的继续深埋藏过程中, 这些孔隙可以被保存下来^[10,11]。

我国广泛分布着与不整合面有关的油气藏, 如鄂尔多斯盆地奥陶系和三叠系、四川盆地威远震旦系和川东石炭系等, 人们已认识到在暴露时间间隔中大气水在碳酸盐油气储集空间形成中的作用, 但对于暴露时间间隔中大气水在碎屑岩储集空间形成中的作用仍缺乏认识, 国内也无类似实例报道。

鄂尔多斯盆地三叠系延长组是我国最早发现的石油储层和产层之一, 分布于印支期不整合面之下, 最早的勘探工作可追溯到 1907 年^[12], 次生孔隙是延长组砂岩中最为重要的储集空间, 但其形成机理一直没有得到合理的解释, 人们普遍认为与深埋地层中有机酸的溶解作用有关。近年来, 随着各种资料的积累和研究工作的不断深入, 已有大量证据表明, 印支期暴露时间间隔中大气水的淋滤作用是鄂尔多斯盆地延长组砂岩中次生孔隙形成最为重要的机制。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地系指河套盆地以南、渭河地堑以北、罗山—青铜峡断褶带以东、吕梁山以西的广大地区, 它是一个古生代地台及台缘坳陷与中新生代台内坳陷叠合的克拉通盆地^[12]。行政区划上主要包括陕西省北部、甘肃省东部和宁夏回族自治区的大部分地区。鄂尔多斯盆地是我国重要的含油气盆地, 三叠系延长组是重要的石油储层和产层之一^[12]。延长组是以河流和湖泊相为主的陆源碎屑沉积, 底部与中三叠统纸坊组呈不整合接触(平行不整合), 顶部

在印支期暴露时间间隔中受到不同程度的剥蚀, 与侏罗系延安组或富县组呈不整合接触(平行不整合) (表 1), 该暴露时间间隔中大气水对长石等骨架颗粒的溶解作用是否对延长组砂岩储层产生实质性的影响是本文讨论的主要内容。

人们通常将延长组划分为五段、10 个油层组(表 1), 长 7 油层组是最重要的烃源层, 而长 2 和长 6 油层组是最为重要的储集层。在岩石学特征上, 延长组储集层主要由长石砂岩和岩屑长石砂岩构成, 2 种岩石占全部砂岩类型的 90% 以上(图 1), 2 989 个薄片分析结果表明, 碎屑中长石含量的平均值高达 48.1%, 因而长石是延长组砂岩最为重要的骨架组分, 其在成岩过程中的溶解及相应次生孔隙的形成

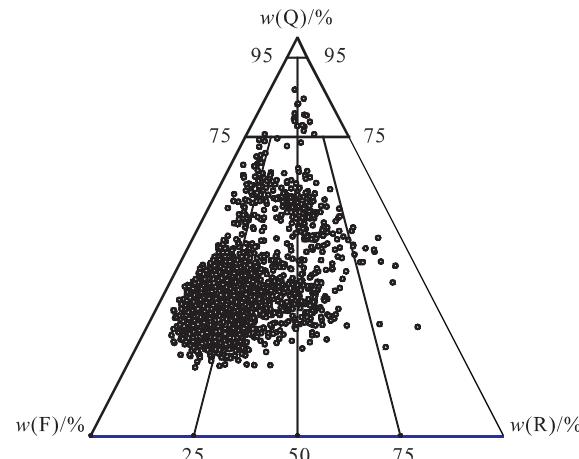


图 1 鄂尔多斯盆地三叠系延长组砂岩碎屑成分三角投点(2 989 个砂岩薄片鉴定结果)^[13]

Fig. 1 Plot of $w(Q)$, $w(F)$, $w(R)$ for 2 989 sandstone samples from analysis results of thin sections in Yanchang Formation of Triassic, Ordos basin

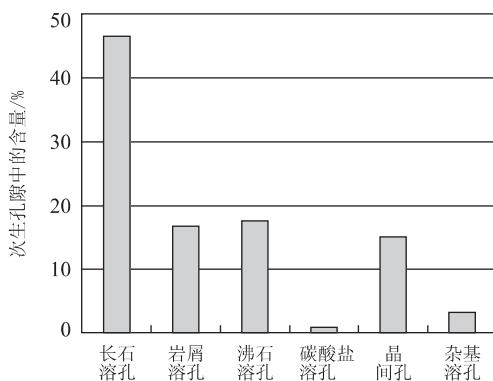


图2 鄂尔多斯盆地三叠系延长组储层砂岩孔隙的构成方式(2 353个砂岩铸体薄片的分析统计结果)

Fig. 2 Histogram for porosity constitution of sandstone reservoir by 2 353 impregnated thin sections in Yanchang Formation of Triassic, Ordos basin

是最为重要的成岩作用。据三叠系延长组2 553个砂岩样品铸体薄片的分析结果,次生孔隙约占岩石储集空间的50%,在次生孔隙中,长石溶孔是最为重要的次生孔隙类型(图2),其提供的储集空间约占次生孔隙的一半,因而对长石溶解机制的正确理解在储层质量预测中具有十分重要的意义。

2 不整合面附近大气淡水作用的证据

已有的研究表明^[7]:不整合面附近大气淡水淋滤作用并产生次生孔隙的证据主要表现在以下几个方面:(1)靠近不整合面附近岩石的物性变好,孔隙度、渗透率增加;(2)靠近不整合面附近由长石等铝

硅酸盐溶解形成的次生孔隙增加;(3)靠近不整合面附近岩石中长石减少,其原因与长石溶解有关;(4)靠近不整合面附近岩石中高岭石增加,其原因显然也与长石等铝硅酸盐矿物的溶解作用有关。

2.1 延长组砂岩岩石物性的纵向变化

鄂尔多斯盆地6 000个左右的储层砂岩样品的孔隙度和渗透率统计结果说明,靠近不整合面上部油层组具有更高的孔隙度和渗透率(图3a,3b),同时从靠近不整合面上部油层组到逐渐远离不整合面的下部油层组,孔隙度和渗透率有逐渐降低的总体趋势。由于渗透率和孔隙度之间的指数函数关系,因而渗透率之间的这种差值更大。当然,控制岩石孔隙度和渗透率变化的因素很多,尤其是沉积因素^[14],如长6是延长期三角洲发育最为完善的时期,因而其物性略好于其上部的长4+5油层组。后边有关孔隙类型纵向变化趋势的讨论将证明岩石物性的这种变化主要是暴露期间大气淡水作用的结果。

2.2 延长组砂岩次生孔隙的纵向变化

铸体薄片分析说明,靠近不整合面上部油层组孔隙度的增加主要是由于次生孔隙的增加造成的,其中主要是长石溶解形成的次生孔隙,其次是岩屑溶解形成的次生孔隙,同时也包括了与长石溶解有关的自生高岭石的晶间孔隙(图4a,4b)。说明靠近不整合面上部油层组具更强的长石等骨架颗粒溶解作用,与下部的长6等油层组相比,长2等上部油层组更远离作为主要烃源层(提供有机酸)的长7油层组(表1,图3),因而很难用埋藏成岩过程中有机

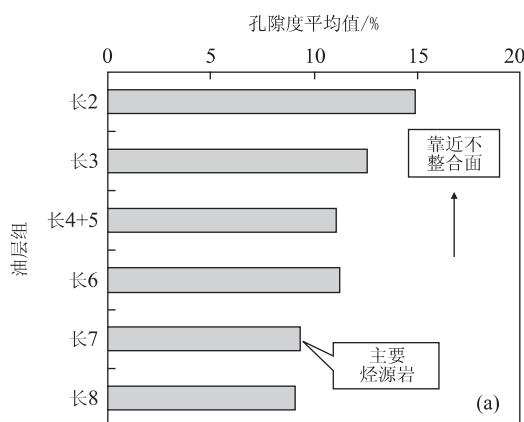
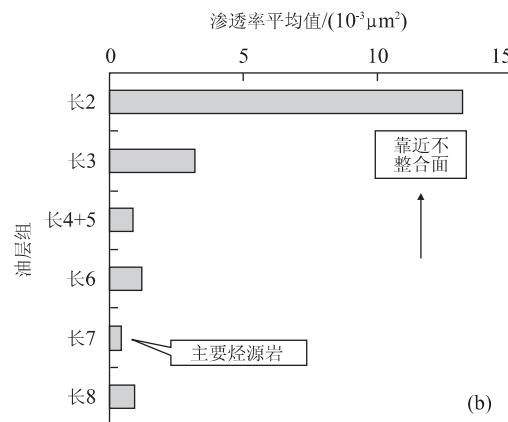


图3 鄂尔多斯盆地三叠系延长组主要储层段(长2—长8)孔隙度(a)和渗透率(b)的纵向变化趋势(平均值指各油层组的平均值,样品总数为59 023个)

Fig. 3 Vertical evolution trend of porosity (a) and permeability (b) of Yanchang Formation (Chang 2—Chang 8) of Triassic, Ordos basin (59 023 samples)



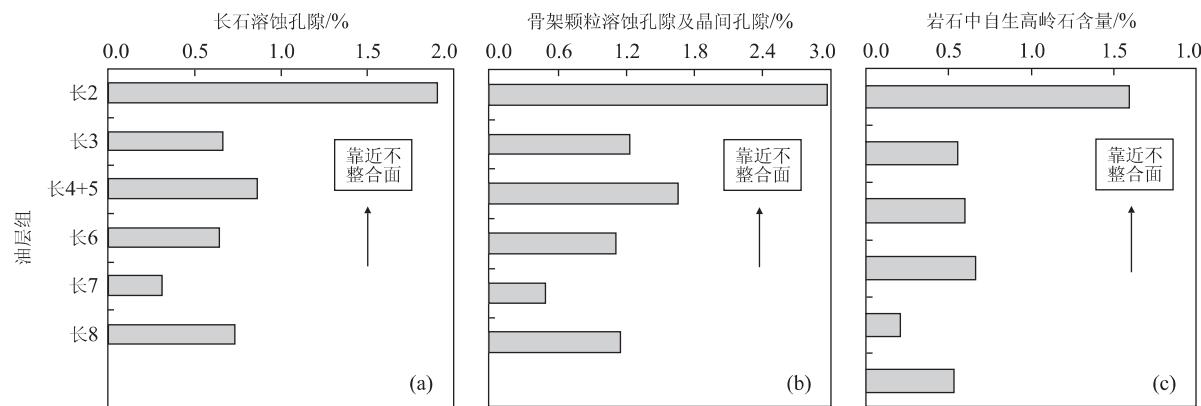


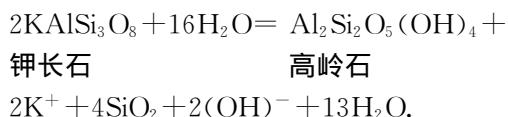
图4 鄂尔多斯盆地三叠系延长组主要储层段(长2—长8)长石溶蚀孔隙(a)、次生孔隙(b)和自生高岭石含量(c)的纵向变化趋势(2353个铸体薄片孔隙分类及薄片分析统计结果)

Fig. 4 Vertical evolution trend of porosity by feldspar dissolution (a), secondary porosity (b) and content of authigenic kaolinite (c) of Yanchang Formation (Chang 2—Chang 8) of Triassic, Ordos basin

藏成岩过程中有机酸对长石的溶解作用来解释, 不整合面附近高岭石的形成机制同样是印支期暴露时

2.3 延长组砂岩中自生高岭石的纵向变化

近地表条件下大气淡水作用的一个重要结果是长石的溶解及伴生的高岭石的沉淀,以钾长石为例,其反应方程可表达为:



鄂尔多斯盆地三叠系延长组主要储集层段(长 2—长 8)2 353 个铸体薄片的统计结果表明,靠近不整合面的长 2 油层组的高岭石含量显著高于其他油层组(图 4c),高岭石的这种纵向分布趋势也很难用埋

藏成岩过程中有机酸对长石的溶解作用来解释,不整合面附近高岭石的形成机制同样是印支期暴露时间间隔中大气水对长石溶解作用的结果

2.4 典型单井剖面延长组砂岩的纵向变化特征

为了避免不同地区孔隙构成差异对孔隙构成纵向变化的影响,笔者选择了一口有代表性钻井的单井剖面来说明延长组砂岩中碎屑长石的含量、高岭石含量、面孔率及次生孔隙的纵向变化(图5)。显示靠近不整合面的上部油层组中存在相当数量的样品具有较低的长石含量、较高的高岭石含量、较大的面孔率和较多的次生孔隙,尤其是由长石溶解形成的次生孔隙。在靠近不整合面附近长石含量的减少与大气淡水的溶解作用有关,并造成高岭石含量的相

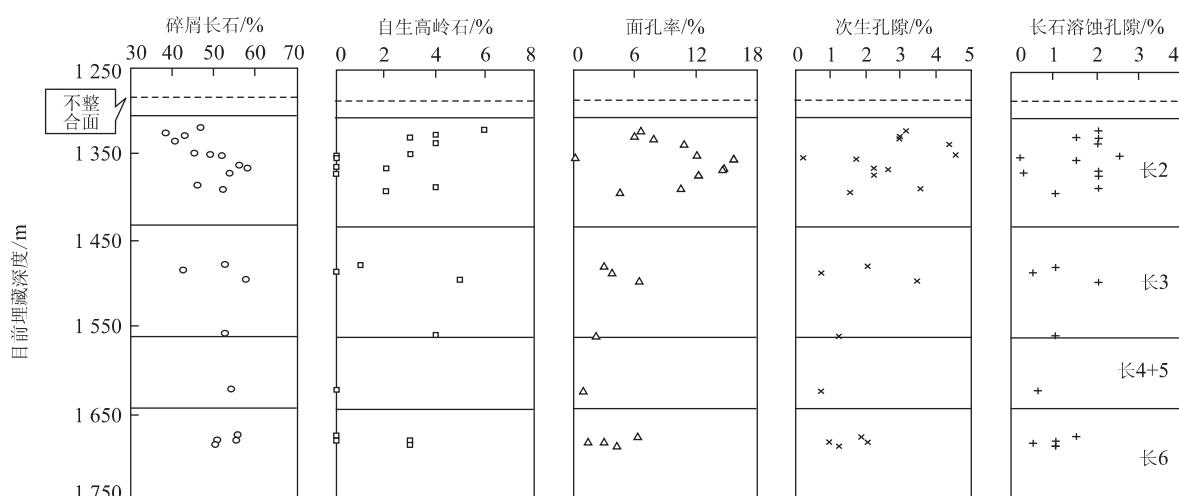


图 5 鄂尔多斯盆地 P 井延长组砂岩长石含量、自生高岭石含量及面孔率、长石溶蚀次生孔隙的纵向变化特征

Fig. 5 Vertical evolution characteristics of content of authigenic kaolinite and feldspar, and thin section porosity and secondary porosity by feldspar dissolution of Yanchang Formation sandstone in Well P, Ordos basin

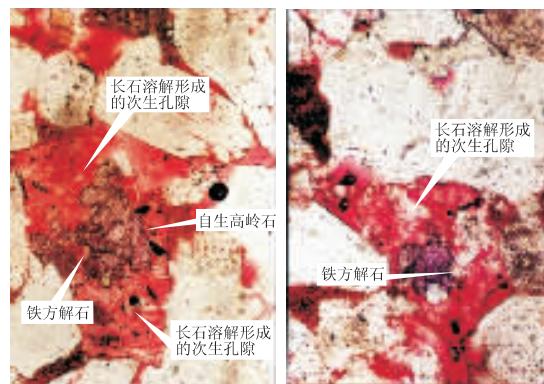


图 6 长 2 段次生孔隙被溶长石的轮廓和被溶解长石残余

Fig. 6 Secondary porosity by feldspar dissolution of Chang 2 member

铸体薄片,茜素红、铁氰化钾混合溶液染色,单偏光,对角线长 1.75 mm

应增加。Emery 等^[9]曾报道过不整合面之下砂岩储层具有低钾特征(自然伽玛能谱测井显示低钾带),其成因与长石的溶解、高岭石的沉淀和 K^+ 离子的流失有关。图 6 是这类样品铸体薄片的典型镜下特征,长石被溶解并转化成高岭石和次生孔隙,高岭石和碳酸盐矿物的沉淀作用是有限的,这是暴露时间间隔中开放体系溶解作用的结果,作为溶解产物的 Si^{4+} 、 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 等离子被地表径流带走,从而有较显著的孔隙净增长。

3 储层质量预测模式的必要更改

对次生孔隙形成机制的正确理解是建立储层质量预测模式的基础。在进行储层质量预测时,必须正确认识成岩过程中物质的迁移方式^[15],包括溶解流体的来源(如是大气淡水还是有机酸)、体系的开放与封闭性(如是近地表的开放条件下还是埋藏成岩过程的封闭条件下)、骨架颗粒易溶组分(如长石)含量变化的原因(是物源变化所致还是成岩因素),其溶出物质的迁移方式及其有关的自生高岭石的分布模式(是否与不整合面的存在有关)。如果对这些变量的理解发生错误,将导致对次生孔隙形成机制和预测模式的错误建立,最终导致储层质量预测的可靠性降低。

如果将延长组砂岩次生孔隙的成因归于埋藏成岩过程中有机酸的溶解作用,那么,这种溶解作用主要取决于埋藏成岩过程中有机酸的运移途径(包括储集层和产生有机酸的烃源层之间相对配置关系、

有机酸的运移通道等)及溶解产物的迁移(如 Al 的络合迁移)和再沉淀等问题就成为储层质量预测过程中的重要变量。如果将延长组砂岩次生孔隙的成因归于印支期暴露时间间隔中大气淡水的溶解作用,那么暴露时间间隔中的古气候、不整合面的地貌形态、地表径流的分布方式,风化速率与构造抬升速率的相对关系等问题就成为储层质量预测过程中的重要变量,从而形成完全不同的储层质量预测模式。

参考文献:

- [1] Surdam R C, Boese S W, Crossey L J. The chemistry of secondary porosity [J]. AAPG Memoir, 1984, 37: 127—149.
- [2] Surdam R C, Crossey L J, Hagen E S, et al. Organic-inorganic and sandstone diagenesis [J]. AAPG Bulletin, 1989, 73: 1—23.
- [3] Hayes M J, Boles J R. Volumetric relations between dissolved plagioclase and kaolinite in sandstones: implications for aluminum mass transfer in the San Joaquin basin, California [J]. Special Publication Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 1992, 47: 111—123.
- [4] Surdam R C, Crossey L J. Integrated diagenetic modeling: a process-oriented approach for clastic systems [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 1987, 15: 141—170.
- [5] 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实验研究 [J]. 沉积学报, 1995, 13(1): 7—17.
HUANG S J, YANG J J, ZHANG W Z, et al. Experimental study of feldspar dissolution by acetic acid at different burial temperatures [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1995, 13(1): 7—17.
- [6] Bjørlykke K, Nedkvitne T, Ramm M, et al. Diagenetic processes in the Brent Group (Middle Jurassic) reservoirs of the North Sea: an overview [J]. Geological Society Special Publications, 1992, 61: 263—287.
- [7] Ehrenberg S N. Kaolinized, potassium-leached zones at the contacts of the Garn Formation, Haltenbanken, mid-Norwegian continental shelf [J]. Marine and Petroleum Geology, 1991, 8: 250—269.
- [8] MacGowan D B, Surdam R C. Difunctional carboxylic acid anions in oilfield waters [J]. Organic Geochemistry, 1988, 12: 245—259.
- [9] Emery D, Myers K J, Young R. Ancient subaerial exposure and freshwater leaching in sandstones [J]. Geol-

- ogy (Boulder), 1990, 18: 1178—1181.
- [10] Ramm M. Porosity-depth trends in reservoir sandstones theoretical models related to Jurassic sandstones offshore Norway [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1992, 9: 553—567.
- [11] Bloch S, Franks S G. Preservation of shallow plagioclase dissolution porosity during burial implications for porosity prediction and aluminum mass balance [J]. *AAPG Bulletin*, 1993, 77: 1488—1501.
- [12] 长庆油田石油地质志编写组. 中国石油地质志——长庆油田[M]. 北京: 石油工业出版社, 1992. 1—22.
Editorial Committee of Petroleum Geology of Changqing Oilfield. Petroleum geology of China: Changqing oilfield [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992. 1—22.
- [13] 刘宝珺. 沉积岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 1980. 125—127.
LIU B J. *Sedimentary petrology* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1980. 125—127.
- [14] 黄思静, 侯中建. 地下孔隙度和渗透率在时间和空间上的变化及影响因素[J]. *沉积学报*, 2001, 19(2): 224—232.
HUANG S J, HOU Z J. Spatio-temporal variation of subsurface porosity and permeability and its influential factors [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2001, 19(2): 224—232.
- [15] Kupecz J A, Gluyas J, Bloch S. Reservoir quality prediction in sandstones and carbonates: an overview [J]. *AAPG Memoir*, 1997, 69: vii—xxiv.

Generation of Secondary Porosity by Meteoric Water during Time of Subaerial Exposure:

An Example from Yanchang Formation Sandstone of Triassic of Ordos Basin

HUANG Si-jing, WU Wen-hui, LIU Jie, SHEN Li-cheng, HUANG Cheng-gang

(State Key Laboratory of Oil/Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Secondary porosity is the most important reservoir space in the sandstone. The authors present an example of leaching by meteoric water in the Yanchang Formation sandstone of Triassic of Ordos basin. The interpretation is based on the information of detailed research of thin sections and a lot of statistical data. Yanchang Formation sandstone lies beneath the unconformity at the base of the Jurassic section. Subsequent detailed petrographic study has confirmed that the potassium depletion has brought about potassium feldspar dissolution, resulting in precipitation of kaolinite and creation of secondary porosity. The evidence strongly suggests the subaerial exposure of the Yanchang Formation sandstone in Early Jurassic and consequent freshwater leaching of the Yanchang Formation sandstone and generation of the secondary porosity. So secondary porosity of Yanchang Formation sandstone is not formed by the dissolution of organic acid during the time of burying diagenesis. The prediction model of reservoir quality should be modified by means of the new mechanisms of generation of secondary porosity.

Key words: Ordos basin; Yanchang Formation of Triassic; clastic reservoir; secondary porosity; meteoric water.