



徐登辉,王燕,韩学辉,等. 2018. 一种实用的定量表征岩石视压实率和视胶结率的实验方法. 地球物理学进展, 33(1): 0274-0278, doi: 10.6038/pg2018BB0114.

XU Deng-hui, WANG Yan, HAN Xue-hui, et al. 2018. Experimental method for quantitative characterization of apparent compaction rate and apparent cementation rate. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 33(1): 0274-0278, doi: 10.6038/pg2018BB0114.

一种实用的定量表征岩石视压实率和视胶结率的实验方法

Experimental method for quantitative characterization of apparent compaction rate and apparent cementation rate

徐登辉¹, 王燕², 韩学辉^{1*}, 聂俊光¹, 姚冰¹, 李昊¹, 江家洋¹

XU Deng-hui¹, WANG Yan², HAN Xue-hui^{1*}, NIE Jun-guang¹, YAO Bing¹, LI Hao¹, JIANG Jia-yang¹

1. 中国石油大学(华东) 地球科学与技术学院, 山东青岛 266555

2. 中国石油测井有限公司新疆分公司, 新疆克拉玛依 834000

1. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Shandong Qingdao 266555, China

2. China petroleum logging Company Limited Xinjiang branch, Xinjiang Karamay 834000, China

摘要 对于目前分布最为广泛的砂岩储层, 压实和胶结等成岩作用会影响砂岩储层的物性、弹性等物理性质并最终决定岩石颗粒的接触性质和孔隙结构特征。根据前人的研究, 定量表征岩石压实和胶结作用的参数主要有视压实率和视胶结率、成岩综合系数等。目前尚缺乏一套系统完整的实验方法来确定岩石的成岩系数。实际应用时, 前人多根据经验公式和薄片资料来确定原始孔隙度和胶结物含量, 误差较大, 流程复杂。本文立足实验手段, 在前人研究的基础上, 提出了一套系统的实验室确定视压实率和视胶结率的方法。结果表明, 实验获得的视压实率、视胶结率与孔隙度、渗透率以及分选系数等存在较好的相关关系, 符合前人研究的结果。

关键词 视压实率; 视胶结率; 原始孔隙度; 胶结物含量

中图分类号 P631

文献标识码 A

doi: 10.6038/pg2018BB0114

Abstract Sandstone forms the most widely distributed reservoirs in the world. The diagenesis procedures of the sandstone, such as compaction and cementation, affect its physical and elastic properties and ultimately determine the contact properties of the sand grains and the pore structures. Based on previous studies, the main parameters that can be used to quantitatively characterize the compaction and cementation of the rock include the apparent compaction rate, apparent cementation rate and the comprehensive coefficient of diagenesis. However, up until now, there is no systematic experimental method developed for determining the diagenesis coefficient. In practice, most of the previous methods are based on empirical formula and slice data to determine the original porosity and cement content with large error and complex process. Based on the previous research, this paper puts forward a set of methods to determine the apparent compaction rate and apparent cementation rate. The results show that there is a good correlation between apparent compaction rate, apparent cementation rate and porosity, permeability and separation coefficient which are consistent with the result of previous studies.

Keywords apparent compaction rate; apparent cementation rate; original porosity; cement content

0 引言

从一般意义上来说, 成岩相是在成岩与构造等作用下, 沉积物经历一定成岩作用和演化阶段的产物, 包括岩石颗粒、胶结物、组构、孔洞缝等综合特征(时卓等, 2011)。分析压实、胶结等成岩作用的作用机制和对沉积物的综合影响对于我们研究储集层岩石矿物组成、孔隙结构乃至预测有利储层分布具有重要的指导意义。目前用于表征成岩作用的定量参数主要包括视压实率、视胶结率、视微孔率和成岩综合系数等(郑浚茂和庞明, 1989; 胡海燕等, 2007; 时卓等, 2011;

谭开俊等, 2011)。视压实率和视胶结率所反映的压实、胶结作用在广泛分布的砂岩储层成岩相研究中尤为重要。计算视压实率和视胶结率主要需要确定原始孔隙度和胶结物含量这两个关键参数。对于原始孔隙度的计算, 最常用的方法是应用 R. snaider 图版或者根据 Beard 和 Weyl 的关于原始孔隙度和分选系数的统计关系式得到。通过上述方法获得的原始孔隙度经验性较强, 考虑因素不全面, 难以满足目前致密砂岩储层成岩相精细评价的需要。而对于胶结物含量, 目前主要是采用铸体薄片的方法来确定, 流程复杂, 误差较大。综合上述方法, 目前尚缺少一套完整的确定压实、胶结作用参数

收稿日期 2017-07-18; 修回日期 2018-01-09.

投稿网址 <http://www.progeophysics.cn>

基金项目 国家自然科学基金(U1562108)、国家科技重大专项(2017ZX05009001)和“十三五”专项(2016ZX05011-002)联合资助。

第一作者简介 徐登辉, 男, 1992 年生, 硕士研究生, 研究方向为岩石物理实验。(E-mail: 1131925545@qq.com)

* 通讯作者 韩学辉, 男, 1974 年生, 副教授, 研究方向为储层岩石物理。(E-mail: hanxuehui@upc.edu.cn)

的实验方法. 本文从实验角度出发, 在前人研究的基础上, 完善了原始孔隙度的实验确定方法并简化了计算胶结物含量的实验流程, 将最终得到的视压实率、视胶结率与孔隙度、渗透率以及粒度参数进行建模得到了很好的拟合效果.

1 视压实率、视胶结率定义

Houseknecht(1987) 提出了视压实率、视胶结率的计算公式. 在对成岩相的研究中, 前人总结出了成岩综合系数法来定量表征包括压实作用和胶结作用在内的成岩作用(郑浚茂和庞明, 1989; 谭开俊等, 2011; 胡海燕等, 2007). 视压实率、视胶结率和成岩综合系数的计算公式为

$$\text{成岩综合系数} = [\text{孔隙度} / (\text{视压实率} + \text{视胶结率})] \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{视压实率} = [(\text{原始孔隙体积} - \text{压实后粒间体积}) / \text{原始孔隙体积}] \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{视胶结率} = [\text{胶结物总量} / (\text{胶结物总量} + \text{粒间孔隙体积})] \times 100\% \quad (3)$$

从视压实率和视胶结率的定义中我们可以看出计算这两个参数我们首先需要确定原始孔隙度和胶结物含量这两个参数.

2 原始孔隙度实验确定方法

2.1 石英砂堆积实验

砂岩原始孔隙度的求取一般是采用 R. snaider 图版或者是 Beard 和 Weyl 统计建立的分选系数和砂岩原始孔隙度的实验关系式. 其中 R. snaider 图版只能大概估计原始孔隙度的范围, 不能满足定量研究的需要; Beard 和 Weyl 通过制作人工颗粒堆积体测量得到不同砂体的原始孔隙度, 建立了分选系数与原始孔隙度的实验关系式为 (Beard and Weyl, 1973; Scherer, 1987):

$$\Phi_0 = 20.91 + (22.9 / \text{sorting}) \quad (4)$$

但是该模型没有考虑平均粒径等其他因素对砂岩原始孔隙度的影响, 结果精度难以保证. Beard 和 Weyl 的实验方法是一个易于实现的方法, 本文我们在该方法原理的基础上, 对关系式进行检验和修正, 在考虑分选系数的同时还应考虑平均粒径等其他影响砂岩原始孔隙度的参数, 最终建立一个能够真实反映砂岩原始孔隙度的实验统计关系.

本次研究中, 我们配制了不同分选和粒径的石英砂来模拟 Beard 和 Weyl 的干砂堆积实验, 检验和校正他们关于原始孔隙度和分选系数的实验统计关系式, 实验步骤为:

(1) 将不同粒径的石英砂按照配方混合均匀;

(2) 将混合好的石英砂倒入体积计量容器中, 经过夯实模拟砂的机械重组作用至体积不再发生明显变化;

(3) 根据石英砂的质量 m 、视体积 v 以及石英砂的密度 ρ 计算原始孔隙度, 公式为

$$\Phi = 1 - m/v\rho \quad (5)$$

表 1 给出了本次实验测得的原始孔隙度, 表中 Md 代表粒径中值, S_o 代表特拉斯科分选系数, Φ 代表原始孔隙度.

为了研究原始孔隙度的影响因素, 我们根据 Beard 和 Weyl 以及我们的实验数据做了原始孔隙度与分选系数和粒度中值的交会图.

表 1 原始孔隙度计算结果

Table1 Calculation results of original porosity

序号	Md/mm	S_o	$\Phi/\%$	序号	Md/mm	S_o	$\Phi/\%$
1	0.18	1.21	46.2	11	0.38	1.2	40.59
2	0.18	1.41	40	12	0.38	1.31	41.59
3	0.18	1.51	38.29	13	0.38	1.51	37.75
4	0.18	1.71	34.32	14	0.38	1.69	34.84
5	0.18	1.93	34.11	15	0.38	1.94	33.37
6	0.18	2.41	31.71	16	0.38	2.61	29.7
7	0.23	1.21	39.65	17	0.53	1.2	41.13
8	0.23	1.29	33.86	18	0.53	1.31	35.69
9	0.23	1.31	32.56	19	0.53	1.65	34.59
10	0.23	1.52	30.91	20	0.53	1.71	32.06
11	0.23	1.78	30.66	29	0.53	1.93	30.22
12	0.23	2.61	28.56	30	0.53	2.61	24.44
13	0.28	1.2	37.68	31	0.62	1.22	37.54
14	0.28	1.21	34.28	32	0.62	1.32	35.84
15	0.28	1.41	31.86	33	0.62	1.51	35.05
16	0.28	1.71	33.63	34	0.62	1.7	33.85
17	0.28	1.94	31.89	35	0.62	1.94	31.59
18	0.28	2.61	26.72	36	0.62	2.4	26.6

图 1a 和图 1b 分别是 Beard 和石英砂堆积的原始孔隙度和分选系数交会图, 图 2a 和图 2b 分别是 Beard 和石英砂堆积的原始孔隙度和粒径中值交会图. 从图中我们看出, 随分选系数的增大原始孔隙度逐渐下降, 而原始孔隙度与粒径中值也存在一定的关系, 并不是 Beard 和 Weyl 描述的没有相关性.

根据实验数据, 我们综合分选系数和粒度中值拟合出原始孔隙度的关系式为

$$\text{Model1 } \Phi = 0.25 / \text{sorting} + 0.184, R = 0.809 \quad (6)$$

$$\text{Model2 } \Phi = 54.16 \times Md^4 - 99.18 \times Md^3 + 59.06 \times Md^2 + 14.65 \times Md + 0.25 / \text{sorting} + 1.454, R = 0.906 \quad (7)$$

从相关性系数 R 来看, 综合分选系数和粒径中值建立的原始孔隙度计算模型精度更高, 实用性更强. 也说明, 在计算原始孔隙度的时候我们不仅要考虑分选的影响也要考虑粒径的影响.

针对天然样品, 若没有相关样品我们可以根据上述实验统计关系式计算原始孔隙度数值, 但天然样品胶结复杂, 压实程度普遍较高, 应用石英砂堆积实验的统计关系式效果可能不佳. 如果有岩心样品我们可以根据下列流程测量得到原始孔隙度.

需要注意的是, 我们没有采用 Beard 和 Weyl 湿砂堆积实验的方法, 因为在实际操作中, 对于湿砂的夯实过程会损失部分细粒颗粒且样品的烘干过程耗时长、难以控制. 另外在样品解离和去胶结物时, 不能太过用力破碎原有的颗粒, 去胶结物时应充分反应.

3 胶结物含量确定方法

本次实验选用样品为人工砂岩, 骨架颗粒为石英砂, 胶

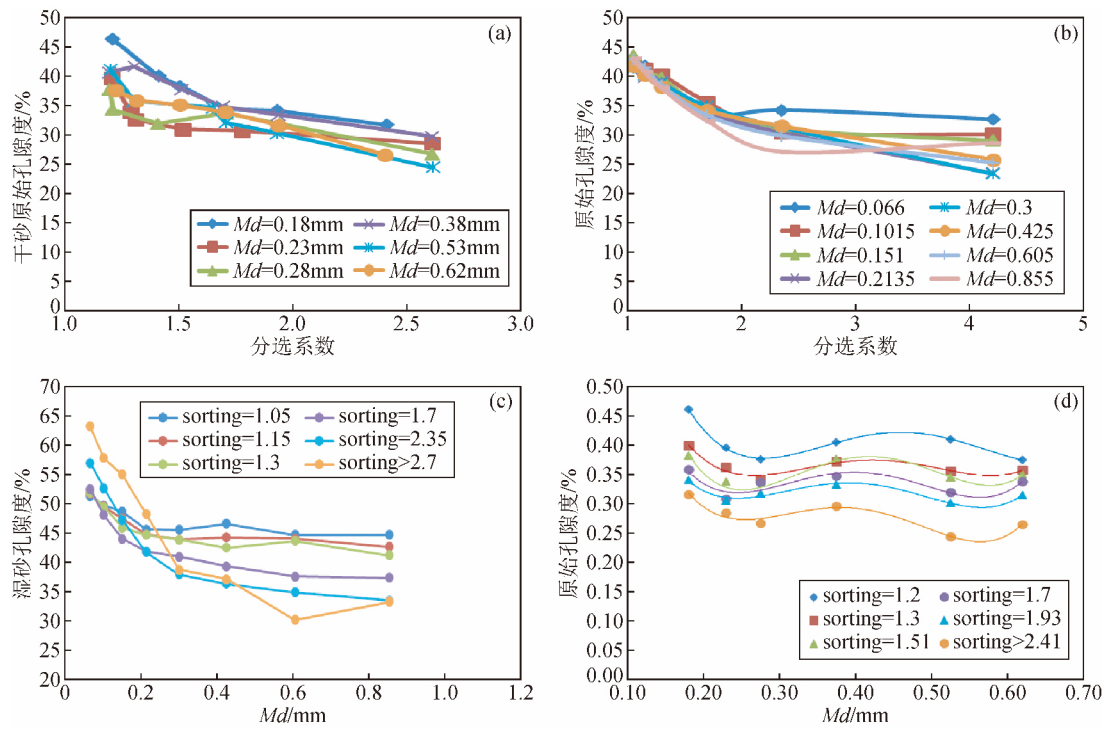


图1 原始孔隙度与分选系数和粒度中值的交会图

Fig. 1 The intersection of original porosity and sorting coefficient and grain size

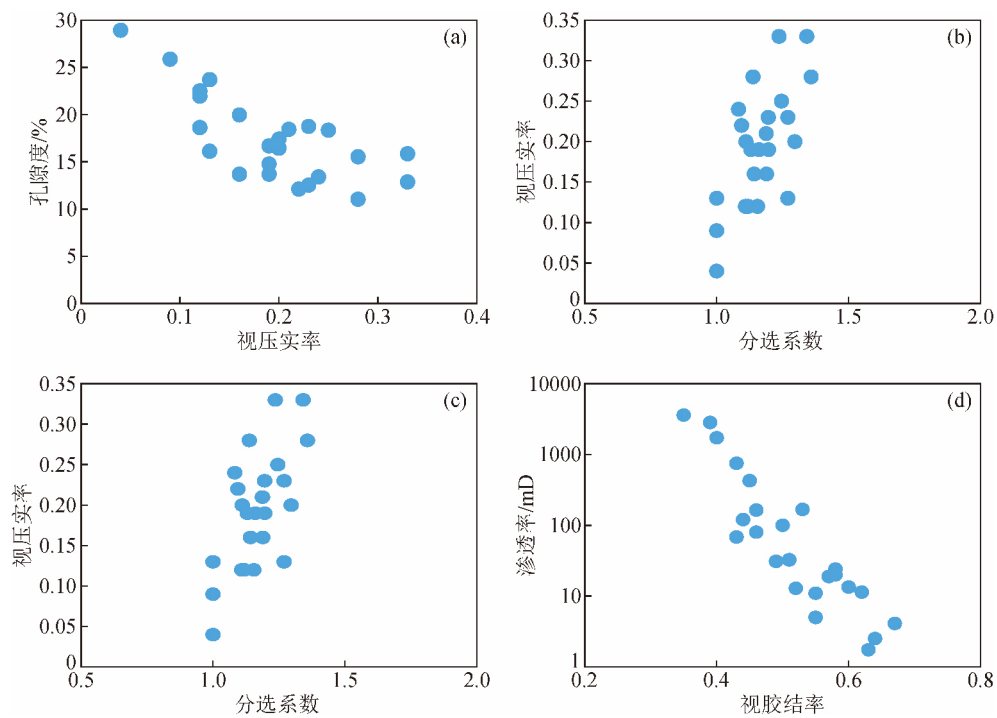


图4 视压实率、视胶结率与孔隙度、渗透率、分选系数关系

Fig. 4 The relationship between apparent compaction rate, apparent cementation rate and porosity, permeability and sorting coefficient

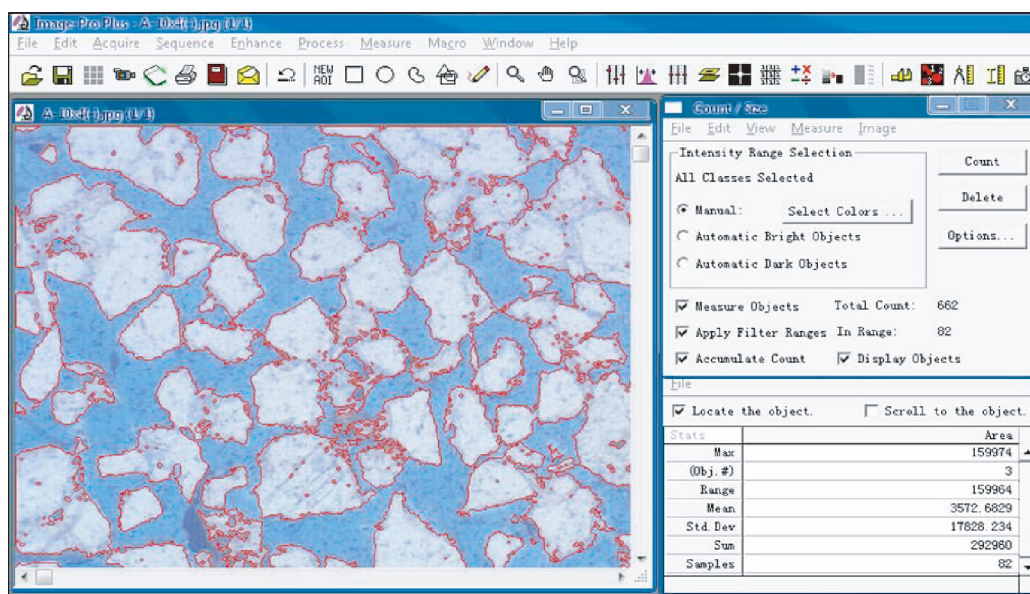


图3 Image Pro Plus 软件应用界面

Fig.3 Application interface diagram of Image Pro Plus

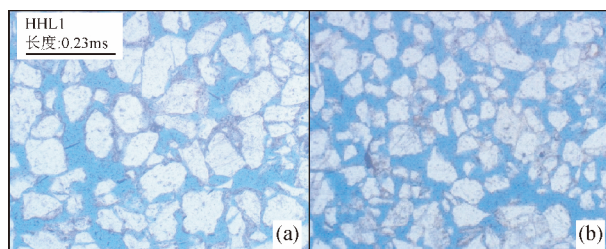


图2 人工砂岩铸体薄片(蓝色染料)

Fig.2 Casting thin sections of artificial argillaceous rock

结物为环氧树脂和黏土. 因此, 在确定胶结物含量时, 我们可以通过确定骨架颗粒以及孔隙的体积百分比来计算得到胶结物的百分比含量.

首先, 我们获得样品的铸体薄片照片如图2所示. 我们采用 Image-ProPlus 这款软件对铸体薄片照片进行处理. 处理

时, 我们应用 IPP 软件如图3中的 AOI 系统选定所需区域的颜色, 计算该区域的面积百分比, 即可得到碎屑颗粒以及孔隙的百分比, 从而计算视压实率和视胶结率, 具体操作步骤为:

- (1) 用鼠标选取目标区域直至所需的区域全部被覆盖;
- (2) 选定以后单击 count 键, 在弹出的窗口中选择想要计算得到的参数, 本次计算需要用到选定目标的面积百分比;
- (3) 当选择的是孔隙中的铸体时, 可以选择 fill hole 将所有的孔隙选定, 忽略孔隙中的小颗粒;
- (4) 应用软件应用得到的碎屑颗粒面积百分比和孔隙面积百分比可以得到胶结物百分含量.

4 实验数据及效果分析

我们根据视压实率和视胶结率的定义计算得到人工样品的视压实率和视胶结率, 如表2所示.

表2 视压实率、视胶结率计算结果表

Table 2 Calculation results of apparent compaction rate and apparent cementation rate

编号	$\Phi/\%$	P/MPa	α	β	编号	$\Phi/\%$	P/MPa	α	β
A	28.93	6	0.04	0.35	2	13.7	15	0.16	0.63
B	25.87	6	0.09	0.39	3	16.44	25	0.2	0.58
C	15.54	25	0.28	0.52	4	13.7	20	0.19	0.6
D	15.86	25	0.33	0.46	5	13.41	25	0.24	0.62
E	17.41	10	0.2	0.51	6	12.12	20	0.22	0.67
F	16.12	10	0.13	0.55	9	16.69	20	0.19	0.53
G	18.75	16	0.23	0.44	10	14.77	10	0.19	0.58
H	18.35	16	0.25	0.43	11	12.53	15	0.23	0.64
I	18.44	12	0.21	0.49	12	12.87	25	0.33	0.57
J	19.97	12	0.16	0.46	13	11.04	25	0.28	0.55
K	22.51	10	0.12	0.43	14	18.63	10	0.12	0.5
L	21.96	8	0.12	0.45	19	23.7	15	0.13	0.4

岩石的成岩作用会使岩石的孔隙度降低,物性变差.并且成岩作用越强,孔隙度越小,孔隙结构越复杂.赖锦、王贵文等(赖锦等,2015)的研究表明,分选越差的岩石,压实胶结作用越强,孔隙度越小.宋子齐等(宋子齐等,2006)指出胶结物对储层的影响,总的趋势是使孔隙和喉道变小,孔隙形态复杂化,因而降低了其储集性能;胶结物含量越高,对储层物性的影响越大.采用视胶结率来表征胶结物对储层的影响.我们应用视压实率和视胶结率与孔隙度、渗透率以及分选系数等参数进行建模,结果如图4所示.

分析图4,我们可以看出,视压实率与孔隙度成负相关关系,与分选系数成正相关关系;视胶结率与孔隙度、渗透率成负相关关系.压实、胶结作用越强,视压实率、视胶结率越大.本次实验所得的结果与前人研究结论吻合,结果准确.

5 结论与认识

5.1 目前用来确定原始孔隙度的方法经验性较强,误差较大,难以满足研究需要.应用干砂堆积实验的方法可以准确的测得岩石的原始孔隙度.改进的原始孔隙度实验统计关系式考虑因素更为全面,计算结果更为准确.

5.2 应用 Image Pro Plus 软件处理铸体薄片照片确定胶结物含量的方法,方法简便,软硬件要求较低,是一种确定岩石胶结物含量的好方法.

5.3 应用实验方法确定得到的视压实率、视胶结率与孔隙度、渗透率以及分选系数等参数的拟合关系符合前人的认识,能够反映岩石的压实、胶结作用程度.

致谢 感谢审稿专家提出的修改意见和编辑部的大力支持!

References

Beard D C, Weyl P K. 1973. Influence of texture on porosity and permeability of unconsolidated sand [J]. AAPG Bulletin, 57(2): 349-369.

- Scherer M. 1987. Parameters influencing porosity in sandstones: A model for sandstone porosity prediction [J]. AAPG Bulletin, 71(5): 485-491.
- Houseknecht D W. 1987. Assessing the relative importance of compaction processes and cementation reduction of porosity in sandstone [J]. AAPG, V 71, No 6.
- Hu Haiyan, Peng Shibi, Lu Chunhui etc. 2007. Evolution of diagenetic reservoir facies and reservoir space of the lower Cretaceous spring head formation in Xinli oilfield, Jilin [J]. Journal of Palaeogeography, 9[1]: 97-106.
- Lai Jin, Wang Guiwen, Huang Longxing etc. 2015. Quantitative division of diagenetic facies of tight sandstone reservoir and its logging identification method [J]. Mineral rock geochemical Bulletin, 34(1): 128-138.
- Shi Zhuo, Zhang Haitao, Wang Yongli. 2011. Type of diagenetic facies and logging identification in Sulige gas field reservoir [J]. Foreign logging technology, (4): 13-17.
- Song Ziqi, Wang Jing, Lu Xiangwei etc. 2006. Quantitative evaluation method of diagenetic reservoir facies in ultra-low permeability reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 13(2): 21-23.
- Tan Kaijun, Xu Duonian, Yi Lu etc. 2011. The quantitative study of diagenetic facies in The Triassic in Wu Xia area of Junggar Basin [J]. Lithologic Reservoirs & Lith Res, 23(6): 24-29.
- Zheng Junmao, Pang ming, 1989. Study on diagenesis of clastic reservoir [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1-133.

附中文参考文献

- 胡海燕,彭仕宓,卢春慧等. 2007. 吉林新立油田下白垩统泉头组成岩储集相及储集空间演化[J]. 古地理学报, 9(1): 97-106.
- 赖锦,王贵文,黄龙兴等. 2015. 致密砂岩储集层成岩相定量划分及其测井识别方法[J]. 矿物岩石地球化学通报, 34(1): 128-138.
- 时卓,张海涛,王永莉. 2011. 苏里格气田储层成岩相类型及测井识别[J]. 国外测井技术, (4): 13-17.
- 宋子齐,王静,路向伟等. 2006. 特低渗透油气藏成岩储集相的定量评价方法[J]. 油气地质与采收率, 13(2): 21-23.
- 谭开俊,许多年,尹路等. 2011. 准噶尔盆地乌夏地区三叠系成岩相定量研究[J]. 岩性油气藏, 23(6): 24-29.
- 郑浚茂,庞明. 1989. 碎屑储集岩的成岩作用研究[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1-133.