

# 高邮凹陷阜一段差异成岩作用及成因

纪友亮<sup>1</sup>, 王艳艳<sup>1</sup>, 刘玉瑞<sup>2</sup>, 卢欢<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249; 2. 中国石化江苏油田地质研究院, 江苏扬州 225000)

**摘要:** 高邮凹陷阜一段处于不同成岩阶段的储层出现了大致相同的成岩矿物的成岩现象, 通过对目的层成岩阶段、成岩现象分析, 结合构造、盆地流体等因素, 提出差异成岩原理, 认为当地层倾斜角度不大时, 同一时代的地层往往处于相同的成岩阶段; 早期成岩阶段的产物可能会在晚期成岩阶段中残留; 当地层倾角较大时, 同一时代的地层可能处于不同的成岩阶段, 深部成岩流体的向上流动使浅部处于早期成岩阶段的储层具有晚期成岩现象。

**关键词:** 差异成岩; 成岩阶段; 成岩序列; 阜一段; 高邮凹陷

中图分类号: P624.6

文献标志码: A

## Differential Diagenesis and Its Genetic Analysis of 1<sup>st</sup> Member of Funning Formation in Gaoyou Depression

Ji Youliang<sup>1</sup>, Wang Yanyan<sup>1</sup>, Liu Yurui<sup>2</sup>, Lu Huan<sup>1</sup>

(1. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. Institute of Jiangsu Oil Bureau SINOPEC, Yangzhou 225000, China)

**Abstract:** It is found that the diagenetic minerals are quite similar in reservoirs that are undergoing different stages of diagenesis for 1<sup>st</sup> member of Funning Formation in Gaoyou Depression. The principle of differential diagenesis was summarized up through the research of diagenetic stage and minerals considering the tectonic structures and fluid in the depression. When the formation dip angle is small, formations of the same age will be at the same stage of diagenesis, early diagenetic minerals will be preserved in late diagenetic stage; when the formation dip angle is large, different diagenetic stages will be conducted in formations of the same age, deep seated diagenetic fluid may upwell, leading to late diagenetic minerals precipitate in shallow buried reservoir that early diagenetic stage dominates.

**Key words:** differential diagenesis; diagenetic stage;

diagenesis series; 1<sup>st</sup> member of Funning Formation; Gaoyou Depression

高邮凹陷是位于苏北盆地南部的箕状断陷, 古新世末期吴堡运动期间, 由于断块差异沉降, 形成了一个南断北超、南陡北缓的箕状结构。真武运动期间, 凹陷内形成了真 1 和真 2 两条深大断裂和凹陷内分布广泛的断裂系统。以真 1 和真 2 两条断裂为界, 凹陷的构造单元分为南部断阶带、中部深凹带和北部斜坡带(图 1)。凹陷内阜一段为一套位于古近系下部的阜宁组一段碎屑岩地层, 其岩性以棕红色及灰色砂岩、粉砂岩、砂砾岩及灰色泥岩为主, 主要为三角洲和扇三角洲前缘沉积。坳陷内断裂系统广泛发育, 成岩过程复杂。

## 1 阜一段成岩序列及成岩阶段划分

### 1.1 成岩序列

成岩序列是成岩事件发生的相对时间顺序。根据纪友亮<sup>[1]</sup>的研究, 压实作用贯穿整个成岩演化过程, 此过程中孔隙度始终发生着变化(图 2a), 然而在深度 3 500 m 以下粒间体积则基本保持不变(图 2b)。在成岩演化序列中, 有的成岩事件是阶段性的, 而有的持续时间较长; 同时, 不同成岩事件可表现出相互承转或重叠的特点, 同一事件还可以不止一次发生(图 3)。在早成岩阶段, 石英次生加大到 I 级, 早期方解石开始沉淀, 此时压实作用较弱。到了中成岩 A 期, 压实作用进行到中等到强的程度, 石英次生加大到 II 级。中成岩 A<sub>1</sub> 期主要是颗粒和早期方解石的溶解, 研究区内还见少量铁方解石的沉淀(图 4a)。凹陷内最主要的溶蚀作用发生在中成岩 A<sub>1</sub> 期。A<sub>2</sub> 期是颗粒的溶解和铁方解石、铁白云石胶结物的沉淀

收稿日期: 2013-03-10

基金项目: 国家自然科学基金(41272157); “十一五”国家重大科技专项(2011ZX05003-002, 2011ZX05009-003)

第一作者: 纪友亮(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为沉积学、储层地质学和层序地层学。

E-mail: jiyouliang@cup.edu.cn



成岩阶段	期	中成岩			
	亚期	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	B	
埋深/m		1 000	2 000	3 000	4 000
最大孔隙度/%	40	韦庄			
	30	陈堡和花瓦			
	20	沙埕			
	10	深凹带			
自生矿物	方解石	——			
	铁方解石	——			
	铁白云石	——			
	石英	——			
	绿泥石	——			
	伊利石	——			
	高岭石	——			
溶蚀作用	长石溶蚀	——			
	方解石溶蚀	——			
	铁方解石溶蚀	——			
颗粒接触关系		点-线	点-线	线-凹凸-缝合	
主要孔隙类型		混合孔	混合孔	粒内孔-微裂缝	

图 3 阜一段成岩阶段划分

Fig. 3 Division of diagenetic paragenesis for 1<sup>st</sup> member of Funning Formation

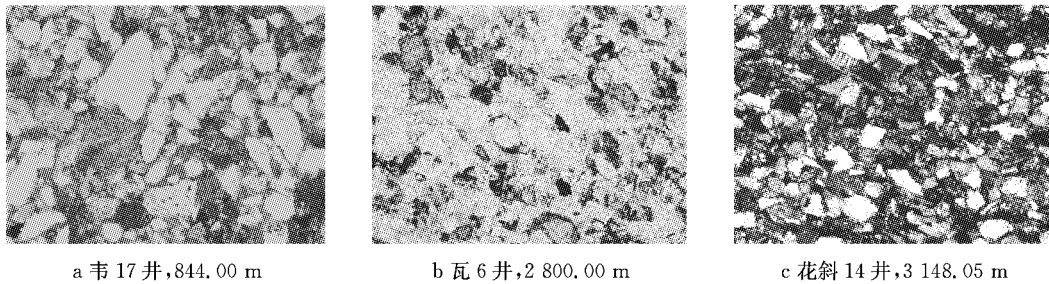


图 4 阜一段成岩作用类型镜下特征(100 倍)

Fig. 4 Diagenetic characteristics of 1<sup>st</sup> member of Funning Formation

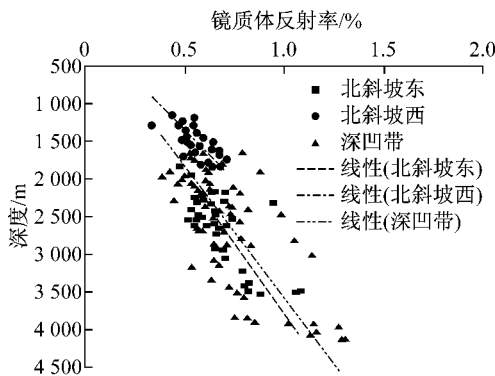


图 5 高邮凹陷阜一段镜质体反射率与深度关系

Fig. 5 Plots of Ro distribution with buried depth of 1<sup>st</sup> Member of Funning Formation in Gaoyou Depression

秋花等<sup>[3]</sup>的研究有一定差别。

## 2 差异成岩现象

根据钻井揭示的阜一段的埋深来看,埋藏最浅的区块在韦庄,最浅处埋深不足 1 000 m,埋藏最深处位于深凹带,最大揭示深度 4 300 m.与戴南组相比,阜一段埋藏浅的部位成岩阶段能达到中成岩 A<sub>1</sub> 期,算是很高了,其原因与埋藏史有关,即阜一段经历了比现在埋藏深度更大的埋深,如北斜坡沙埕地区(表 2,图 6a),在经历了三垛运动抬升之后,虽然后期仍然继续埋藏,但其幅度小于抬升的幅度,造成该地区现今埋藏深度小于最大古埋深.凹陷内的不

表 1 高邮凹陷阜一段成岩阶段及特点

Tab. 1 Stage of diagenesis and its characteristics of 1<sup>st</sup> member of Funning Formation of Gaoyou Depression

成岩阶段	R <sub>o</sub>	镜下现象	S
中成岩 A <sub>1</sub>	0.50~0.75	见长石和方解石同时溶蚀,同时见少量铁方解石胶结	40%~45%
中成岩 A <sub>2</sub>	0.75~1.10	见长石和岩屑的溶解,在粒间孔或者粒内溶孔中有发育晶形很好的铁白云石和铁方解石	
中成岩 B	1.20~1.40	颗粒成线-凹凸接触或者缝合接触,颗粒的定向性比较明显,亮晶铁方解石和铁白云石发育	

注:S为伊蒙混层矿物中蒙脱石的质量分数。

同地区,虽然经历的构造事件相同,但幅度有差异.在深凹带和南部断阶带其三垛时期抬升幅度小于后期的再次埋藏幅度(表 2、图 6b、图 6c).因此就出现了一个现象很不好解释,即在处于中成岩 A<sub>1</sub> 期的储层中,包括含油层段,出现了晚期碳酸盐胶结物,多为自形的铁白云石和铁方解石,这些胶结物本应该在中成岩 A<sub>2</sub> 期以后出现.如果没有 R<sub>0</sub> 和黏土矿物

资料,很容易将这些储层划分到中成岩 A<sub>2</sub> 期,甚至 B 期.这种特殊的成岩现象称为差异成岩现象.这种现象在凹陷北部斜坡带的韦庄地区和南断阶地区发育较为普遍.在南断阶的徐庄、黄庄地区,其伊蒙混层矿物中蒙脱石的质量分数为 40%~45%,成岩阶段处于中成岩 A<sub>1</sub> 期,但其岩石镜下特征却显示铁方解石是普遍存在的(图 7).韦庄地区的岩石镜下也见

表 2 不同地区阜一段储层埋深范围与成岩特点

Tab.2 Diagenetic characteristics and burial depth of 1<sup>st</sup> member of Funning Formation in different districts of Gaoyou Depression

构造位置	地区	埋深/m	孔隙度范围/%	孔隙度平均值/%	成岩阶段	成岩特点
北斜坡	韦庄	800~2 200	2.00~35.00	16.90	中 A <sub>1</sub>	见铁白云石和铁方解石
	沙埕	1 900~3 400	2.00~29.00	13.80	中 A <sub>1</sub> —中 A <sub>2</sub>	见铁白云石和铁方解石
	花瓦	2 500~3 200	2.00~27.00	10.90	中 A <sub>2</sub>	见铁白云石和铁方解石
南断阶	方巷	2 200	8.00~19.66	12.36	中 A <sub>1</sub>	见铁白云石和铁方解石
	许庄	2 250~2 400	2.00~25.00	13.60	中 A <sub>2</sub>	见铁白云石和铁方解石
	小纪	2 600	9.34	9.34	中 A <sub>2</sub>	见铁白云石和铁方解石
	陈堡	1 655~2 700	2.00~33.00	18.86	中 A <sub>1</sub> —中 A <sub>2</sub>	见铁白云石和铁方解石
深凹带	花深	3 000~4 300	1.00~11.00	2.10	中 A <sub>2</sub> —中 B	见铁白云石和铁方解石

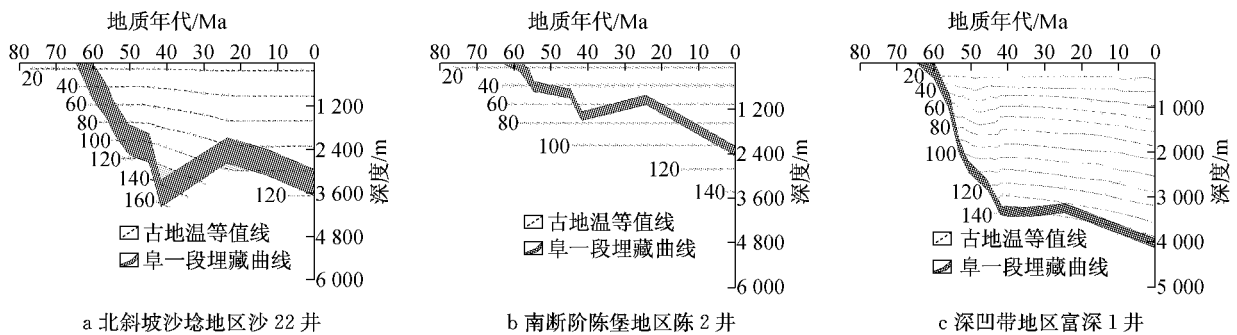


图 6 高邮凹陷不同构造单元代表井阜一段埋藏史

Fig.6 Burial history of 1<sup>st</sup> member of Funning Formation in different districts of Gaoyou Depression

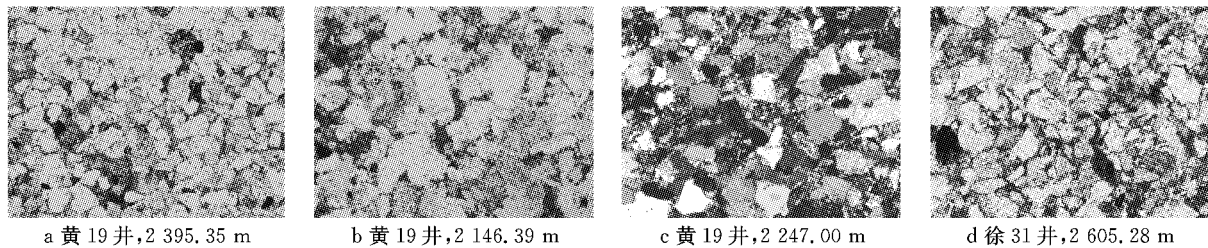


图 7 徐庄和黄庄地区岩石镜下特征

Fig.7 Lithologic characteristics in sandstones in Xuzhuang and Huangzhuang

到了这种普遍存在的现象(图 4a).

### 3 差异成岩原理

以流体、岩石相互作用作为成岩作用研究的关键点<sup>[4-5]</sup>,结合阜一段地层构造、盆地流体活动及成岩阶段划分提出差异成岩的概念和模式.差异成岩

原理如下:在埋藏成岩过程中,不同的成岩阶段有不同的成岩产物.当地层倾斜角度不大时(图 8),同一时代的地层往往处于相同的成岩阶段.处于较晚成岩阶段的储层,一定经历了较早成岩阶段,因而残留有早期成岩阶段的产物.如处于中成岩 B 期的储层,一定经历了早成岩阶段和中成岩阶段的 A<sub>1</sub> 及 A<sub>2</sub> 期,因此储层中既有中成岩阶段 B 期的成岩产

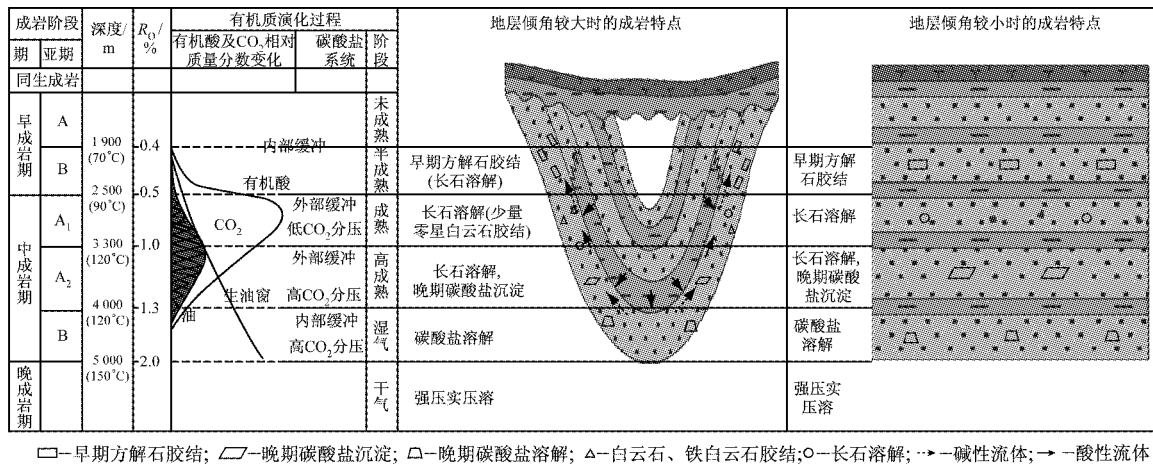


图 8 差异成岩原理

Fig. 8 Schematic diagram summarizing the principle of differential diagenesis

物,如可发育晚期碳酸盐胶结物,也有早期成岩阶段保留的成岩产物,如方解石胶结等. 而处于较早成岩阶段的储层一般不会出现较晚期成岩阶段的产物.

但当地层倾斜角度较大时(图 8), 同一时代的地层往往处于不同的成岩阶段,埋藏深度大的部位所处的成岩阶段较晚,埋藏深度较浅的部位所处的成岩阶段较早. 埋深较大、处于晚成岩期部位的储层一定经历了较早成岩阶段,如处于中成岩 B 期的储层,一定经历了早成岩阶段和中成岩阶段的 A<sub>1</sub> 及 A<sub>2</sub> 期,因此储层中既有中成岩阶段 B 期的成岩产物,如可发育晚期铁白云石和铁方解石,也有早期成岩阶段保留下来的成岩产物,如方解石、次生溶蚀孔隙等. 同一时代的地层,其储层横向上连通的可能性很大,储层内部的流体可以横向流动. 在压实作用

下,深部流体沿储层向上倾方向流动,给浅部的储层带来深部的成岩物质,使得浅部处于较早成岩阶段的储层出现较晚成岩阶段的产物. 如处于早成岩 B 期的储层,可以有来自深部的酸性流体,而产生次生孔隙,也可以形成铁白云石和铁方解石等晚期碳酸盐胶结物.

韦庄地区阜一段埋藏浅,仅处于中成岩 A<sub>1</sub> 期,本不该出现晚期碳酸盐胶结物,但是在韦庄地区阜一段储层中也发现了少量零星铁方解石和铁白云石胶结物,其原因可能是凹陷内处于中成岩 A<sub>2</sub> 和中成岩 B 期的流体沿活动断层及储层向上倾方向运动,使原本处于较早成岩阶段的地方形成了中成岩 B 期的胶结物. 高邮凹陷阜一段地层水的离子浓度垂向分布特征(图 9)显示,在 2 500~3 000 m 深度段,离

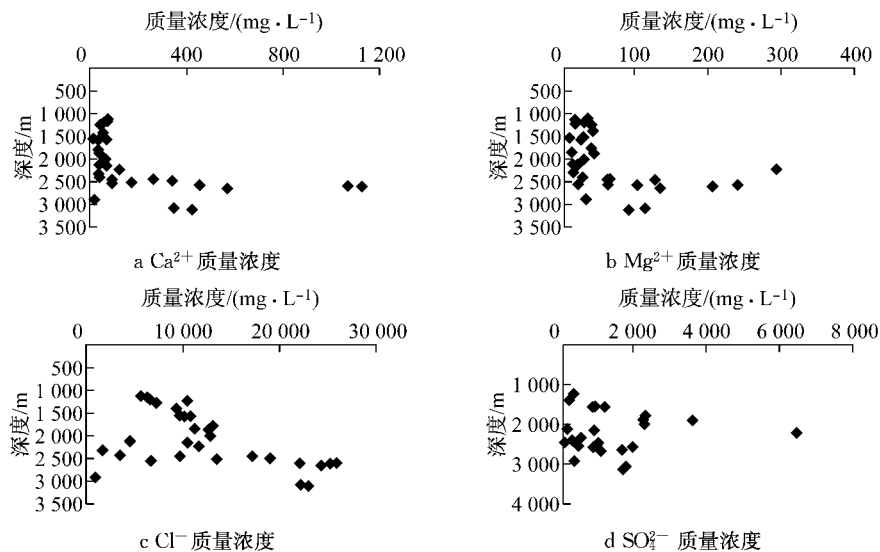


图 9 高邮凹陷阜一段地层水中离子质量浓度垂向分布

Fig. 9 Ionic concentration distribution with buried depth of 1<sup>st</sup> member of Funning Formation in of Gaoyou Depression

子质量浓度陡然增大.图中采样点主要集中在凹陷的南断阶带.凹陷内部存在复杂的断裂系统,南断阶地区的流体通过凹陷中部的深大断裂向浅部的斜坡地区运移,导致相对高温的富含  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  的流体在浅部形成晚期碳酸盐胶结物.

这种差异成岩作用导致了本处于中成岩  $A_1$  期

的溶蚀孔发育的储层增加了晚期碳酸盐的胶结物,堵塞孔隙,使储层物性变差.表3是高邮凹陷阜一段处于中成岩  $A_1$  的区块代表井,通过表中数据可以看出,储层中晚期碳酸盐胶结构质量分数越高,其孔隙度就越小.因此,在进行储层物性评价时,既要考虑成岩阶段,也要考虑这种差异成岩作用对于储层物

表3 高邮凹陷阜一段中成岩  $A_1$  期代表井岩石成分及孔隙度

Tab.3 Lithology composition and porosity in  $A_1$ -substage of middle diagenesis of 1<sup>st</sup> member of Funing Formation of Gaoyou Depression

井号	井深/m	岩性或样品类型	质量分数/%						孔隙度/%
			石英	长石	方解石	白云石	铁白云石	黏土矿物	
徐31	2 608.00	油浸粉细砂岩	46.2	30.8	5.9	1.9	10.4	4.9	9.6
徐31	2 624.20	油斑粉细砂岩	49.7	26.8	8.3	4.1	6.7	4.4	9.8
黄89	2 500.88	粉砂岩	36.2	24.7	9.0	11.8	9.7	8.6	4.6
韦11	2 152.20	油斑粉砂岩	47.7	30.5	8.5	5.6	5.0	2.8	17.7

性的影响.

## 4 结论

(1)高邮凹陷阜一段成岩序列如下:压实作用从成岩开始即发生,伴随成岩演化的全过程.在早成岩阶段,石英次生加大到Ⅰ级,早期方解石沉淀,压实作用弱.到了中成岩 A 期,压实作用中等到强,石英次生加大到Ⅱ级.  $A_1$  期主要发生颗粒和方解石的溶解,  $A_2$  期是颗粒的溶解和铁方解石、铁白云石胶结物的沉淀.到了中成岩 B 期,石英次生加大到Ⅱ—Ⅲ级,主要发生晚期碳酸盐岩胶结物的溶蚀,压溶作用增强.

(2)高邮凹陷阜一段目前大多数地区处于中成岩 A 期,深凹带地区成岩阶段处于中成岩 B 期和中成岩  $A_2$  期,韦庄地区成岩程度浅,处于中成岩  $A_1$  期.

(3)阜一段的成岩演化阶段具有一定的特殊性,存在差异成岩现象,产生这种现象的原因是由于同一时代的地层埋藏深度差异较大,在流体横向运移作用下,相对深部储层的成岩流体进入相对浅部的储层,使得浅部处于较早的成岩阶段的储层发育较晚成岩阶段的矿物.

## 参考文献:

- [1] 纪友亮. 油气储层地质学[M]. 2版. 东营: 中国石油大学出版社, 2009.  
JI Youliang. Petroleum reservoir geology [M]. 2nd ed. Dongying: China University of Petroleum Press, 2009.
- [2] 钟大康, 朱筱敏, 周新源, 等. 次生孔隙形成期次与溶蚀机理——以塔中地区志留系沥青砂岩为例[J]. 天然气工业, 2006, 26(9): 21.  
ZHONG Dakang, ZHU Xiaomin, ZHOU Xinyuan, et al. Phases of secondary pore generation and dissolution mechanism: taking silurian Asphaltic sandstone in central tarim basin as an example [J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(9): 21.
- [3] 宋秋花, 宋全友, 陈刚强, 等. 高邮凹陷北斜坡阜宁组储层成岩作用特征[J]. 断块油气田, 2009, 16(5): 20.  
SONG Qiu-hua, SONG Quanyou, CHEN Gangqiang, et al. Diagenetic characteristics of funing formation reservoir in the north of Gaoyou Depression [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2009, 16(5): 20.
- [4] 李忠, 陈景山, 关平. 含油气盆地成岩作用的科学问题及研究前沿[J]. 岩石学报, 2006, 22(8): 2113.  
LI Zhong, CHEN Jingshan, GUAN Ping. Science problems and frontiers of sedimentary diagenesis research in oil-gas-bearing basins [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(8): 2113.
- [5] 寿建峰, 朱国华. 砂岩储层孔隙保存的定量预测研究[J]. 地质科学, 1998, 33(2): 118.  
SHOU Jianfeng, ZHU Guohua. Study on quantitative prediction of porosity preservation in sandstone reservoirs [J]. Scientia Geologica Sinica, 1998, 33(2): 118.