

模糊数学法在储层评价中的应用

——以鄂尔多斯盆地白于山地区延长组长4+5油层组为例

武春英¹, 韩会平², 蒋继辉³, 李 勇⁴, 王宝清⁵, 李园园⁴, 张琬茜⁴

(1 长庆油田 采油六厂, 陕西 西安 710021; 2 长庆油田 勘探开发研究院, 陕西 西安 710021;

3 长庆油田 录井公司, 陕西 西安 710021; 4 长安大学 地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054;

5 西安石油大学 油气资源学院, 陕西 西安 710061)

摘要: 运用模糊数学综合评判法, 确定储层评判对象因素集, 通过对鄂尔多斯盆地白于山地区延长组长4+5储集层研究, 认为孔隙度、渗透率、排驱压力、分选系数、孔喉均值是储层评判对象因素集。经过储层评判对象因素集逐步回归分析, 建立I~IV类储层分类评价标准, 其中I~III类为有效储层, IV类为非储集层。最后用Q型聚类统计对储层分析, 表明白于山地区长4+5储集层属于II类, 即中等储层。

关键词: 鄂尔多斯盆地; 储层; 模糊数学; 逐步回归分析; Q型聚类统计; 分类评价

中图分类号: P618.130.2⁺1; TE122.2⁺4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2008)02-0156-05

Application of Fuzzy Math Method to Reservoir Evaluation

—Taking Chang 4+5 Reservoir of Yanchang Formation in Baiyushan Area in Ordos Basin as an Example

WU Chun-ying¹, HAN Hui-ping², JIANG Ji-hui³, LI Yong⁴,

WANG Bao-qing⁵, LI Yuan-yuan⁴, ZHANG Wan-qian⁴

(1 No.6 Production Plant, Changqing Oilfield Limited, Xi'an 710021, Shaanxi, China; 2 Institute of Exploration and Development, Changqing Oilfield Limited, Xi'an 710021, Shaanxi, China; 3 Well Logs Company, Changqing Oilfield Limited, Xi'an 710021, Shaanxi, China; 4 School of Earth Sciences and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 5 School of Oil and Gas Resources, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

Abstract This paper studies the object factor sets of reservoir evaluation in Baiyushan area through comprehensive evaluation by the method of fuzzy mathematics. Firstly, the porosity, permeability, displacement pressure, sorting coefficient, pore throat are ascertained to be the object factor sets and the judgement classificatory standard for evaluation of types I~IV is set up by progressive regression analysis, among which, the reservoir types I~III are effective reservoirs, and there is no reservoir in type IV. Then, the reservoir is analyzed overall by Q-model gathering statistics. The result shows that the sandstone belongs to type II, that is, medium reservoir.

Key words: Ordos basin; reservoir; fuzzy mathematics; progressive regression analysis; Q-model gathering statistics; classification evaluation

0 引言

白于山地区位于鄂尔多斯盆地陕北斜坡中部

的陕西省安塞县、志丹县和靖边县(图1), 面积约220 km², 区内三叠系延长组发育。长4+5油层组沉积于三角洲前缘环境, 水下分流河道中发育储集

收稿日期: 2007-07-09

作者简介: 武春英(1980-), 女, 山西忻州人, 从事石油地质和沉积研究。E-mail: hanhp_cq@petrochina.com.cn

©1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

砂体,受沉积、成岩作用的影响,该区延长组长4+5储集层形成千差万别的孔隙结构,孔隙度1.49%~16.22%,平均11.4%,渗透率(0.004~182.0)×10⁻³ μm²,平均1.26×10⁻³ μm²。由此可见,储集层总的特点是低孔隙度、低渗透率、物性较差。弄清楚其储层的内在差别对今后勘探开发和油田增储上产都具有极大的现实意义。笔者采用模糊数学综合评判法对其储层进行全面分析,即运用逐步回归分析法和Q型聚类统计分析法确定储层分类评价标准,通过综合分析,预测成藏有利区。

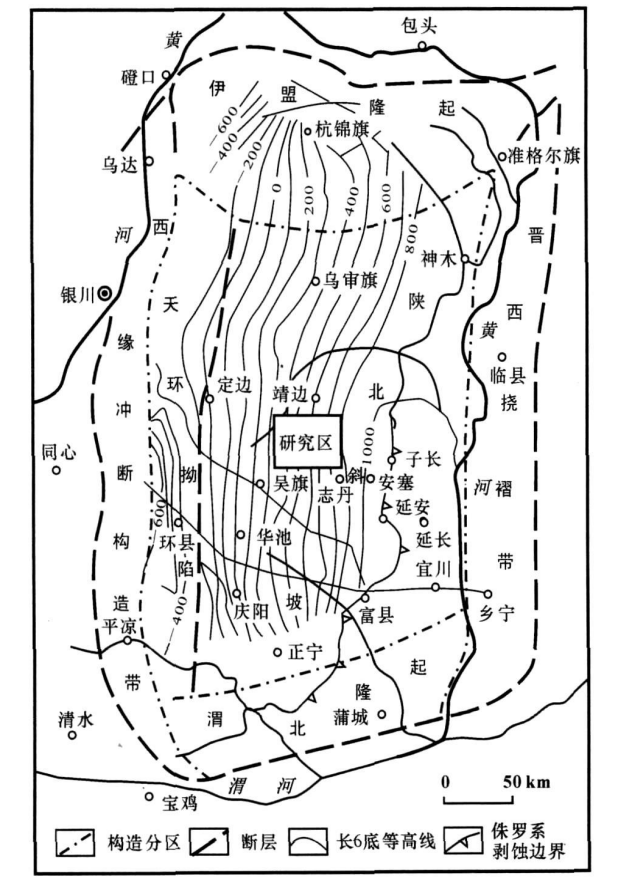


图1 研究区构造位置
Fig.1 Geotectonic Location of Baiyushan Area

1 储集层孔隙发育特征

1.1 孔隙类型

根据成因和油藏勘探开发的需要并结合邱世祥等孔隙类型分类方案^[1],白于山地区长4+5油层组储集层孔隙类型主要有5种。

1.1.1 粒间孔

碎屑岩中颗粒之间被杂基或胶结物填充的部分即为粒间孔^[2],本区包括原生粒间孔、缩小的粒间孔和溶蚀粒间孔。

原生粒间孔是沉积期间形成的碎屑颗粒间的孔隙,岩石为颗粒支撑,理论上原生碎屑颗粒之间为点接触,砂质沉积物的原生孔隙度为30%~80%。受沉积环境的控制及成岩作用影响,研究区储集岩原生粒间孔很难得以保存。

缩小的粒间孔是原生粒间孔经成岩作用特别是压实作用改造的孔隙。经压实作用,砂岩碎屑颗粒之间的接触强度加大,孔隙度减小。研究区储集岩中的原生粒间孔都经受了压实作用的改造。

溶蚀粒间孔是原生粒间孔受到不同程度溶蚀作用的改造而成。溶蚀的碎屑颗粒可以是长石、岩屑或石英。研究区除长石可以形成规模较大的粒间溶蚀孔外,其余溶蚀强度不大。

1.1.2 粒内容蚀孔

粒内容蚀孔为碎屑颗粒部分溶蚀所形成的孔隙,对改善砂岩储层的储集性能起到积极的作用^[3]。在所研究的储集岩中,长石碎屑的溶蚀非常普遍,粉砂岩岩屑粒内容蚀孔少见。长石的解理缝、双晶缝、岩屑斑晶与基质的接触面往往首先被溶蚀,随着溶蚀作用的加强,粒内容蚀孔会逐渐变大。粉砂岩岩屑粒内容蚀孔是由于碳酸盐胶结物的溶蚀而成。

1.1.3 铸模孔或残余铸模孔

粒内容蚀孔进一步发展,整个碎屑颗粒被溶蚀,孔隙具有原碎屑的形状,即为铸模孔。如果碎屑颗粒基本被溶解,但还有残余,在偏光显微镜下模糊可见,则为残余铸模孔。这些孔隙的形成在一定程度上提高了岩石的渗透率^[4],研究区常见长石溶解而形成的长石铸模孔。

1.1.4 胶结物溶蚀孔

本区胶结物溶蚀孔主要是由于成岩过程中的大量化学沉积物析出所致^[5]。浊沸石的溶蚀孔是储集岩中常见的一种次生孔隙。由于浊沸石次生溶蚀孔的产生,在埋藏较深的储集岩中可以产生较多的孔隙空间^[6]。

1.1.5 微孔

微孔指直径小于0.5 μm的孔隙,可以是泥质杂基间孔隙、粘土矿物晶间孔、矿物内的解理缝隙、岩屑内孔隙、粉砂级碎屑之间的微孔隙。由于研究区储集岩中的自生粘土矿物有较好的晶形,陆源粘土矿物重结晶普遍,粘土矿物晶间孔常见。石英晶体与粘土矿物晶体之间都存在大量微孔,从成因上讲,微孔可以是原生的,也可以是次生的。

1.2 裂缝类型

根据显微薄片分析和电镜扫描观察, 裂缝主要存在于长石、云母颗粒内和切穿颗粒或沿层面分布, 可归结为长石缝、云母溶蚀缝、层间缝和岩石缝^[7]。总的来说, 研究区储集岩裂缝不发育, 在岩心和薄片很少见裂缝。裂缝宽 0.005~0.2 mm, 长 0.5~5 mm, 一般为溶蚀缝。

1.3 孔隙组合类型

研究区储集岩中常见的孔隙组合由粒间孔和铸模孔或残余铸模孔组成, 此种组合的出现将大大提高岩石的渗透率。

2 储集层的孔隙结构参数

研究岩石的孔隙结构, 实质是研究岩石的孔隙构成, 它包括研究岩石孔隙的大小、形状、孔间连通

情况、孔隙类型、孔壁粗糙程度等全部孔隙特征和它的构成方式。笔者根据研究区 5 个样品的压汞分析得出了 3 大类 11 项参数(表 1)。

(1)表征储层孔隙性和渗透性的参数为孔隙度、渗透率。

(2)表征孔隙喉道大小及分选性的特征值为排驱压力、饱和度中值压力、饱和度中值半径、孔喉均值、歪度、分选系数、变异系数。

(3)表征孔喉连通性参数为最大进汞饱和度和退汞效率。孔隙、喉道分级标准和命名原则根据实际资料并结合 Pittmax 和 Archie 的经典分类给予确定^[8](表 2)。据此, 将该区延长组低渗砂岩储层划分为 IV 类(图 2); I 类为中小孔中细喉型; II 类为小孔中细喉型; III 类为小孔细喉型; IV 类为细小孔微细喉。I~II 类为有效储层, III 类为非有效储层。

表 1 白于山地区延长组长 4+5 孔隙结构参数

Tab. 1 Pore Structure Parameters in the Chang 4+5 of Yanchang Formation in Baiyushan Area											
样号	孔隙度/ %	渗透率/ 10 ⁻³ μm ²	排驱压力/ MPa	中值压力/ MPa	中值半径/ μm	孔喉均 值/μm	歪度	分选 系数	变异 系数	最大进汞 饱和度/%	退汞率/ %
样 1	13.10	4.020	0.17	1.80	0.41	10.84	0.08	2.66	0.25	78.50	27.40
样 2	14.10	4.750	0.17	3.84	0.19	11.30	-0.22	2.68	0.24	71.60	28.20
样 3	13.40	0.348	0.36	3.71	0.20	11.63	-0.16	2.11	0.18	81.30	22.30
样 4	13.40	1.000	0.28	3.37	0.22	11.50	-0.17	2.33	0.20	77.60	32.36
样 5	11.60	0.004	0.46	3.29	0.22	11.37	1.42	2.31	0.20	94.30	28.50

表 2 延长组孔隙喉道分级标准

Tab. 2 Classification Standard of Porosities and Corridors in Yanchang Formation			
孔隙分级	平均孔径/μm	喉道分级	平均喉径/μm
大孔隙	> 100	粗喉道	> 3.0
中孔隙	100~50	中细喉道	3.0~1.0
小孔隙	50~10	细喉道	1.0~0.5
细孔隙	10~0.5	微细喉道	0.5~0.2
微孔隙	< 0.5	微喉道	< 0.2

3 储集层分类评价

研究区长 4+5 低渗透砂岩储层因受沉积、成岩作用的影响形成千差万别的孔隙结构特征, 储层类别本身就具有一定的模糊性。鉴于此, 采用模糊数学综合评价, 才能尽量准确地反映储层的内在差别, 得出满意地评价结果。

3.1 模糊一级评判(对样品的评判)

3.1.1 因素集和评判等级集的建立

经过逐步回归分析^[9-10], 建立评判对象的因素集

$$U_1 = \{\varphi, k, P_d, r_{ar}, S_p\}$$

式中: φ 为孔隙度; k 为渗透率; P_d 为排驱压力; r_{ar} 为孔喉均值; S_p 为分选系数。

按照储层的孔隙结构特征, 建立相对应的评判等级集合

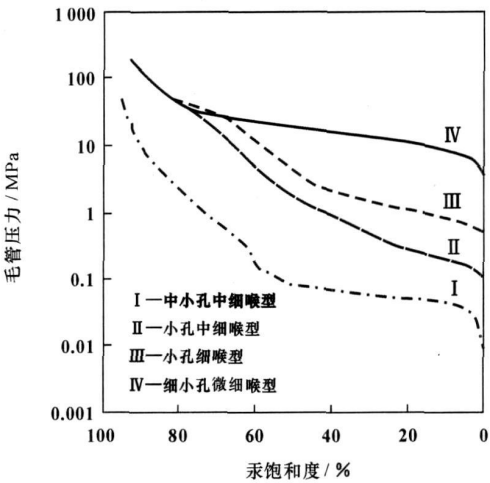


图 2 研究区砂岩毛管压力曲线类型
Fig. 2 Types of Capillary Pressure Curves in Sandstone in Baiyushan Area

$$V_1 = \{ \text{I类, II类, II类, IV类} \}$$

3.1.2 模糊关系矩阵的形成

通常对每个评判因素都有统一的标准,并且多以数字的形式出现。根据压汞分析和铸体薄片观察,并参照前人的储层分类成果^[11-12]把长4+5储

层分为IV类(表3),I~II类为有效储层,IV类为非储集层。

为了便于隶属函数的建立,评价标准以等级范围的形式给出。

对于表3中以范围($a_{i,j-1} \sim a_{i,j}$)形式给出的指

表3 白于山地区延长组储集层分类评价标准

Tab. 3 Standard of Classification Evaluation in Reservoir of Yanchang Formation in Baiyushan Area

类别	孔隙类型	粒度范围	孔隙度/%	渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$	排驱压力/MPa	孔隙均值/ μm	分选系数	评价
I	粒间孔、溶蚀孔	粗砂、中砂	25~15	100~10	0.1~0.3	8.7~9.7	3~2.6	中上等
II	粒间孔、溶蚀孔	细—极细砂	15~10	10~2	0.3~0.5	9.7~10.5	2.6~2.3	中等
III	微孔、溶蚀孔	粉砂	10~5	2~0.01	0.5~0.9	10.5~11.5	2.3~2.1	差
IV	微孔	粉砂	5~1	0.1~0.01	0.9~1.2	11.5~12.5	2.1~1.75	极差

标,隶属函数一般按如下形式选取

$$\mu_{ij}(x) = \begin{cases} 1 & x \text{ 介于 } a_{i0} \sim a_{i1} \\ \frac{a_{i2} - x}{a_{i2} - a_{i1}} & x \text{ 介于 } a_{i1} \sim a_{i2} \\ 0 & x \text{ 介于 } a_{i2} \sim a_{im} \end{cases}$$

($i=1, 2, \dots, 5; j=1$)

$$\mu_{ij}(x) = \begin{cases} 0 & x \text{ 介于 } a_{i0} \sim a_{i,j-2} \\ \frac{x - a_{i,j-2}}{a_{i,j-1} - a_{i,j-2}} & x \text{ 介于 } a_{i,j-2} \sim a_{i,j-1} \\ 1 & x \text{ 介于 } a_{i,j-1} \sim a_{ij} \\ \frac{a_{i,j+1} - x}{a_{i,j+1} - a_{ij}} & x \text{ 介于 } a_{ij} \sim a_{i,j+1} \\ 0 & x \text{ 介于 } a_{i,j+1} \sim a_{im} \end{cases}$$

($i=1, 2, \dots, 5; j=2, 3$)

$$\mu_{ij}(x) = \begin{cases} 0 & x \text{ 介于 } a_{i0} \sim a_{i,m-2} \\ \frac{x - a_{i,m-2}}{a_{i,m-1} - a_{i,m-2}} & x \text{ 介于 } a_{i,m-2} \sim a_{i,m-1} \\ 1 & x \text{ 介于 } a_{i,m-1} \sim a_{im} \end{cases}$$

($i=1, 2, \dots, 5; j=4$)

式中: μ_{ij} 表示某样品的第*i*个因素对第*j*等级的隶属度。将样品的参数值逐一代入上面的隶属函数公式,求出各因素的隶属度,将其组合在一起,便形成了各个样品的一级评判模糊关系矩阵。如1号样品的一级评判模糊关系矩阵为

$$\tilde{R}_1 = \begin{bmatrix} 0.310 & 0.500 & 0.190 & 0.000 \\ 0.126 & 0.500 & 0.373 & 0.000 \\ 0.740 & 0.259 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.330 & 0.500 & 0.170 \\ 0.540 & 0.459 & 0.000 & 0.000 \end{bmatrix}$$

同理可得出其他样品的模糊关系矩阵。

3.1.3 因素权系数模糊集的确定

权系数既要反映物质性的差异,又要反映人对

事物认识上的差异。笔者采用R型聚类统计相关系数法^[13]定量确定权系数模糊集,即用某一因素与其他因素之间的相关系数作为这一因素的权系数

$$\tilde{A}_1 = (0.129, 0.263, 0.241, 0.015, 0.151, 0.214, 0.58)$$

此集合充分反映了渗透率、排驱压力和分选性对低渗透储层的性能起决定性作用,并且和专家的推荐值保持了高度一致。

3.1.4 模糊一级评判结果

\tilde{R} 和 \tilde{A} 求出之后,则一级评判结果按 $\tilde{B} = \tilde{A} \cdot \tilde{R}$,记 $\tilde{B} = \{b_1, b_2, \dots, b_m\}$ 计算。按照最大隶属度原则评定对象的等级(表4)。

表4 模糊一级评判结果

Tab. 4 Results of the First Fuzzy Mathematics Comprehensive Evaluation

样品	I类(中上等)	II类(中等)	III类(差)	IV类(极差)	分类评价
样1	0.368	0.407	0.198	0.025	II
样2	0.396	0.369	0.173	0.060	I
样3	0.128	0.208	0.366	0.297	III
样4	0.181	0.348	0.324	0.144	II
样5	0.048	0.302	0.322	0.326	IV

3.2 模糊二级评判(分区分层评判)

在模糊一级评判中,只对储层中的样品点进行

了分类评价,并不能适应于整个储层。因此,还必须综合所有的样品对储层有一个全面的评价。这就是模糊二级评判,模糊二级评判以一级评判为基础,将目的区域目的层段的所有样品组成二级评判因素集合。研究长4+5的评判对象因素集

$$U_2 = \{ \text{样1, 样2, 样3, 样4, 样5} \}$$

评判等级集合保持不变

$$V_2 = \{ \text{I 类, II 类, II 类, IV 类} \}$$

将因素集中所有样品的模糊一级评判结果组合在一起,就构成了二级评判模糊关系矩阵

$$\tilde{R}_2 = \begin{bmatrix} 0.368\ 07 & 0.407\ 54 & 0.198\ 67 & 0.025\ 72 \\ 0.396\ 29 & 0.369\ 52 & 0.173\ 67 & 0.060\ 52 \\ 0.128\ 55 & 0.208\ 04 & 0.366\ 19 & 0.297\ 22 \\ 0.181\ 79 & 0.348\ 77 & 0.324\ 55 & 0.144\ 89 \\ 0.048\ 47 & 0.302\ 63 & 0.322\ 86 & 0.326\ 04 \end{bmatrix}$$

研究中二级评判因素权系数利用了 Q 型聚类统计分析^[14],将某一样品与其他样品间的相似系数之和组合在一起,归一化得

$$\tilde{A}_2 = (0.199\ 81, 0.198\ 87, 0.200\ 51, 0.201\ 21, 0.199\ 60)$$

评判结果为

$$\tilde{B}_2 = (0.224\ 38, 0.327\ 22, 0.277\ 40, 0.171\ 00)$$

按照最大隶属度原则可知,白于山地区长 4+5 属于 II 类,即中等储层。

4 储集层综合评价及有利区预测

根据砂层厚度、砂/地、孔隙度、渗透率在平面上的变化可以对储集层的变化作出综合评价^[15-16](表 5)。由于白于山地区长 4+5 储集层孔隙度、渗透率普遍较低,差别不明显,因此把砂层厚度和砂/地作为储层综合评价的主要参数,孔隙度和渗透率作为辅助参数。

表 5 延长组长 4+5 储集层综合评价标准

Tab. 5 Standard of Comprehensive Evaluation in the Chang 4+5 of Yanchang Formation

类别	砂层厚度/m	砂/地	孔隙度/%	渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$
I	25~20	>0.7	>13	>3.2
II	20~15	0.7~0.5	13~12	3.2~2.4
III	15~10	0.5~0.3	12~10	2.4~1.2

根据上述储集层评价标准并考虑到产油能力,把成藏有利区分为 3 类。I 类成藏区,储集条件最好,为 I 类储层区,且产油能力也强,I 类储层区如果产油能力差,则降为 II 类成藏区。II 类成藏区,储集条件为 II 类或 I 类,具有较强的产油能力,II 类储层区如产油能力差则降为 III 类成藏区。III 类成藏区储集条件和产油能力均差,或有中等的储集能力,而产油能力很差。

5 结语

通过对该区储集层的孔隙发育特征和孔隙结

构参数的综合分析,在此基础上运用模糊数学方法,经过逐步回归分析,选取孔隙度、渗透率、排驱压力、孔喉均值和分选系数 5 个参数建立评判对象因素集,对储层样品进行分类评价,即模糊一级评判;又综合所有样品并利用 Q 型聚类统计分析对储层进行全面评价,即模糊二级评价。从而较为准确地反映储层的内在差别,对本区“低孔、低渗”砂岩储层作出较为满意的综合评价并预测了有利区。为今后的勘探开发指明了方向,区域内井的钻探结果也很好证明这一论断。

参考文献:

[1] 邱世祥,祝总祺.中国碎屑岩储集层的孔隙结构[M].西安:西北大学出版社,1991.

[2] 郑浚茂,庞明.碎屑储集岩的成岩作用研究[M].武汉:中国地质大学出版社,1998.

[3] 吴胜和.油气储层地质学[M].北京:石油工业出版社,1998.

[4] 王振奇,何贞铭,徐龙,等.鄂尔多斯盆地葫芦河地区三叠系延长组低渗致密砂岩储层特征研究[J].江汉石油学院学报,1998,20(2):27-32.

[5] 王起琼,李文厚,赵虹,等.靖边—安塞地区延长组长 1 段沉积相特征[J].西北大学学报:自然科学版,2006,36(1):107-111.

[6] 赵虹,党 D,党永潮,等.安塞油田延长组储集层特征及物性影响因素分析[J].地球科学与环境学报,2005,27(4):45-48.

[7] 郭德运,赵靖舟,王延玲,等.鄂尔多斯盆地甘谷驿油田上三叠统长 6 油层孔喉结构特征及其影响因素[J].西安石油大学学报:自然科学版,2006,21(1):25-28.

[8] 谢庆邦,贺静.陕甘宁盆地南部延长组低渗砂岩储层评价[J].天然气工业,1994,14(3):16-19.

[9] 付国民,马力宁,屈信中.采用多级模糊综合评判法对剩余油潜力定量评价[J].地球科学与环境学报,2004,26(2):38-41.

[10] 赵永军,李汉林.石油数学地质[M].山东东营:石油大学出版社,1998.

[11] 王允诚.油气储层评价[M].北京:石油工业出版社,1999.

[12] Arps J J. Engineering Concepts Useful in Oil Finding[M]. AAPG Bulletin, 1964.

[13] 王代国.鄂尔多斯盆地塔巴庙地区二叠系下石盒子组盒 1 段砂岩成岩相与储集性能关系[J].地球科学与环境学报,2006,28(1):32-36.

[14] 王允诚.油层物理学[M].北京:石油工业出版社,1993.

[15] 孟国玲,吴吉元.鄂尔多斯盆地北部塔巴庙地区二叠系储层物性影响因素研究[J].西安工程学院学报,2002,24(4):13-17.

[16] 韩会平,王宝清,李勇,等.鄂尔多斯盆地侯北地区延长组长 6 储层评价[J].西安石油大学学报:自然科学版,2005,20(3):61-67.