

地层不整合遮挡油气藏地质储量 计算新方法及其应用

袁 丽

(中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司 纯梁采油厂, 山东 博兴 256504)

摘要: 从几何学的观点出发, 针对纯油藏和具有气顶的油气藏, 采用单储系数、横截面面积与油层横向分布长度三者乘积的方式改进采用单储系数、含油面积与油层厚度三者乘积方式的传统容积法, 提出相应的地层不整合遮挡油气藏地质储量计算新公式, 并根据油气藏的特点提出水平井钻遇油气藏厚度的预测公式。地层不整合遮挡油气藏的地质储量计算目前主要采用容积法, 这类方法不仅计算繁琐, 而且不确定因素较多; 改进后的新方法计算简单方便, 理论性更强, 存在的不确定因素显著减少。采用新方法在高青油田高 424 块高 424-1 井区进行了实践应用。实践表明: 改进的新方法适用于地层不整合遮挡油气藏的地质储量计算及预测水平井钻遇油气藏厚度。

关键词: 地层不整合遮挡油气藏; 储量计算; 容积法; 水平井; 高青油田

中图分类号: P618.13; TE122 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2011)02-0163-05

New Equation for Calculating Geologic Reserves of Stratigraphic Unconformity Screened Reservoir and Its Application

YUAN Li

(Chunliang Oil Production Factory, Shengli Oilfield Branch Company, China Petroleum and Chemical Corporation, Boxing 256504, Shandong, China)

Abstract Based on the view of geometry, the new method with the product of unit reserve factor, cross sectional area and length of transverse distribution of reservoir was developed from the traditional volumetric method with the product of unit reserve factor, oil-bearing area and thickness of reservoir, the new equation for calculating geologic reserves of stratigraphic unconformity screened reservoir was discussed, and the prediction formula for calculating the thickness of reservoir in horizontal well was analyzed according to the characteristic of reservoir. The volumetric method, which was complicated, was used to calculate geologic reserves of stratigraphic unconformity screened reservoir, and there were too many uncertain factors; the new method improved was simple for calculation and strong for theoretical property, and the number of uncertain factor decreased significantly. The new method improved had application in Gao424-1 District of Block Gao424, Gaoqing Oilfield. The results showed that the new method improved was applicable to the calculation of geologic reserves of stratigraphic unconformity screened reservoir and the prediction of the thickness of reservoir in horizontal well.

Key words: stratigraphic unconformity screened reservoir; calculation of reserve; volumetric method; horizontal well; Gaoqing Oilfield

0 引言

近年来, 非构造油气藏的勘探越来越引起广泛关注, 与不整合有关的地层油气藏成为研究的热点之一^[1-10]。地层油气藏大多位于盆地边缘, 是指在

与地层不整合有关的圈闭中形成的油气藏, 一般划分为地层超覆油气藏、地层不整合遮挡油气藏和潜山油气藏 3 种基本型式^[11]。不整合面上下岩石类型有 4 种组合: 砂泥型、砂砂型、泥泥型和泥砂型, 其中最有利于形成地层不整合遮挡油气藏的微观组构

收稿日期: 2010-07-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40972094)

作者简介: 袁 丽 (1981-), 女, 湖南攸县人, 工程师, 从事油田开发研究。E-mail: clyuanli@163.com

为泥砂型(图 1),即储层位于不整合面之下,储层上倾方向被剥蚀,后来又为新的非渗透层遮挡形成的油气藏。在油田勘探初期,该类油气藏地质储量计算目前还停留在常用的容积法。笔者从几何学观点出发,对容积法加以改进,提出了一种适合地层不整合遮挡油气藏的储量计算新方法,并在计算高青油田高 424 块储量的实际应用中取得了良好效果。

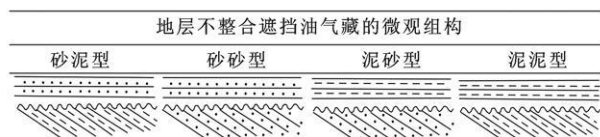


图 1 地层不整合遮挡油气藏的 4 种微观组构

Fig. 1 Four Types of Microscopic Constitution of Stratigraphic Unconformity Screened Reservoir

1 地层不整合遮挡油气藏地质储量的计算

1.1 利用容积法计算油气储量

在油田勘探初期要准确计算储量比较困难,容积法是在油田投产前唯一可利用静态资料计算储量的方法^[12-13]。采用容积法计算石油地质储量的公式为^[9]

$$N = 100AH\varphi S_{oi}\rho_o/B_{oi} \quad (1)$$

式中: N 为原油地质储量 (10^4 t); A 为含油面积 (km^2); H 为平均有效厚度 (m); φ 为平均有效孔隙度 (%); ρ_o 为平均地面脱气原油密度 (t/m^3); S_{oi} 为平均含油饱和度 (%); B_{oi} 为平均地层原油体积系数。

通常把石油地质储量计算公式中 $100\varphi S_{oi}\rho_o/B_{oi}$ 称为单储系数 K_o , 单位为 $10^4 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{m})$ 。石油地质储量计算公式也可以表示为: $N = K_o AH$ 。

溶解天然气地质储量计算公式为

$$G_s = 10^{-4} NR_{si}$$

式中: G_s 为溶解天然气地质储量 (10^8 m^3); R_{si} 为原始溶解气油比 (m^3/t)。

天然气地质储量计算公式为

$$G = 0.01AH\varphi S_{gi} \frac{T_{sc}P_i}{P_{sc}TZ_i} \quad (2)$$

式中: G 为天然气原始地质储量 (10^8 m^3); S_{gi} 为平均原始含气饱和度 (%); T 为平均地层温度 ($^{\circ}\text{C}$); T_{sc} 为地面标准温度 ($^{\circ}\text{C}$); P_{sc} 为地面标准压力 (MPa); P_i 为气藏的平均原始地层压力 (MPa); Z_i 为原始气体偏差系数。

采用容积法计算油气储量的关键,一是圈定含油面积,二是确定油层厚度,三是取全取准原油及天

然气高压物性资料、压汞资料及储层物性资料等,准确计算单储系数。

1.2 容积法不适合地层不整合遮挡油气藏地质储量计算

地层不整合遮挡油气藏的典型油藏剖面如图 2a,假定油藏受不整合面和边界断层控制,其空间展布及在平面上的含油面积如图 2b、c。地层不整合遮挡油气藏存在剥蚀现象和油水内边界及外边界(如图 2a 中井 1 和井 2 钻遇油层情况),油气藏在平面上可分为剥蚀带、中间带、油水过渡带(图 2c),因此在计算其储量时应分别对各个区带加以计算,最后取和。在勘探早期,由于各个区带的含油范围比较难圈定,油层厚度不一且地层不整合遮挡油气藏一般有多砂体含油,容积法在进行表征叠合含油面积、叠加油层厚度时地质意义不大。因此,容积法计算地层不整合遮挡油气藏地质储量,不仅计算繁琐,而且不确定因素较多。

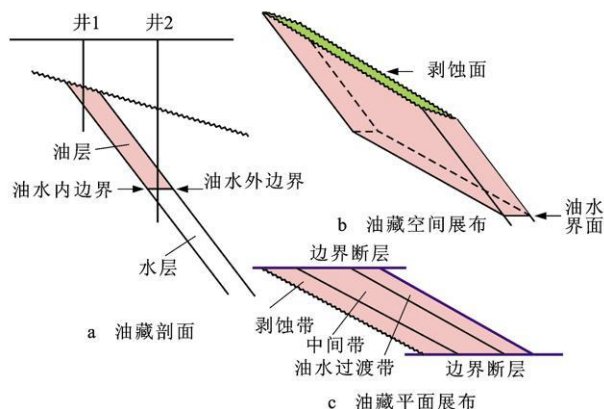


图 2 地层不整合遮挡油气藏的典型油藏剖面以及油藏空间和平面展布

Fig. 2 Typical Reservoir Section Spatial and Horizontal Distribution of Stratigraphic Unconformity Screened Reservoir

1.3 地层不整合遮挡油气藏地质储量计算新方法

1.3.1 新方法的地质模型

传统的容积法计算石油地质储量是将油藏投影到平面上(图 2b),采用单储系数、含油面积、油层厚度三者相乘。而笔者提出的新方法是直接计算油藏体积,采用单储系数、截面面积、油层横向分布长度三者相乘(图 3),即

$$N_o = K_o (S_1 + S_2) L \quad (3)$$

式中: N_o 为原油地质储量 (10^4 t); K_o 为单储系数 ($10^4 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{m})$); $S_1 + S_2$ 为截面面积 (km^2), 其中 S_1 为剥蚀面起伏、砂体与油水界面平行线形成的三角形面积, S_2 为剥蚀面低点处油水界面平行线、砂体和油水界面形成的平行四边形面积; L 为油层横

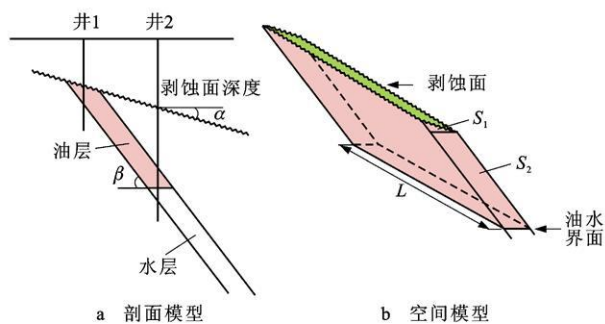


图 3 计算地层不整合遮挡油气藏地质储量的新方法

Fig. 3 New Method for Calculating Stratigraphic Unconformity Screened Reservoir

向分布长度(m)。

1.3.2 新方法在不同情况下的计算公式

(1)在纯油藏情况下的计算公式。从剥蚀面构造图及目的层底面构造图上计算出剥蚀面倾角、目的层地层倾角分别为 α 、 β 以及油层横向分布长度,根据地震、试油试采资料确定油水界面深度为 $-d$ 。从单井测井资料上得出单井钻遇剥蚀面深度、砂体顶深、砂体底深分别为 $-D_1$ 、 $-D_2$ 、 $-D_3$ (除去补心高) (图 4a),则砂体铅直厚度 $D=D_3-D_2$ 。

S_1 的公式推导如下(图 4a)

$S_1=S_{\triangle ABC}$, $AB=D \cot \beta$, $\angle ABC=\alpha$, $\angle ACB=\beta-\alpha$ 则

$$S_1 = \frac{1}{2} (D \cot \beta)^2 \frac{\sin \alpha \sin \beta}{\sin(\beta-\alpha)} = \frac{1}{2} D^2 \frac{\sin \alpha \cos^2 \beta}{\sin(\beta-\alpha) \sin \beta} \quad (4)$$

S_2 的公式推导如下

设点 B 深度为 $-D_4$, 则有

$$(D_1 - D_4) \cot \alpha = (D_2 - D_4) \cot \beta$$

$$D_4 = \frac{D_2 \cot \beta - D_1 \cot \alpha}{\cot \beta - \cot \alpha}$$

$$S_2 = D \cot \beta (d - D_4) = D \cot \beta \cdot \left[d - \frac{D_2 \cot \beta - D_1 \cot \alpha}{\cot \beta - \cot \alpha} \right] \quad (5)$$

将式(4)、(5)代入式(3)中, 得出剥蚀面倾向与地层倾向一致时地层不整合遮挡油气藏石油地质储量计算新公式为

$$N_o = 100DL \cot \beta \left\{ d - \frac{D_2 \cot \beta - D_1 \cot \alpha}{\cot \beta - \cot \alpha} + \frac{D \sin \alpha \cos \beta}{2 \sin(\beta-\alpha)} \right\} \varphi S_{\alpha} \rho_o / B_{oi} \quad (6)$$

当剥蚀面倾角 $\alpha=0$ 时, 地层不整合遮挡油气藏石油地质储量计算新公式为

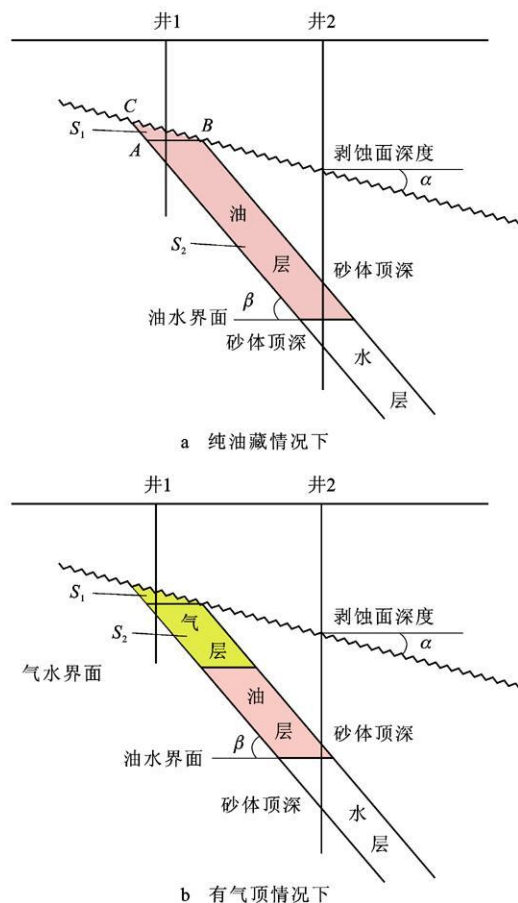


图 4 截面面积求取

Fig. 4 Method for Acquire Section Area

$$N_o = 100DL \cot \beta (d - D_1) \varphi S_{\alpha} \rho_o / B_{oi} \quad (7)$$

当剥蚀面倾向与地层倾向相反时, 地层不整合遮挡油气藏石油地质储量计算新公式为

$$N_o = 100DL \cot \beta \left\{ d - \frac{D_3 \cot \beta + D_1 \cot \alpha}{\cot \beta + \cot \alpha} + \frac{D \sin \alpha \cos \beta}{2 \sin(\beta+\alpha)} \right\} \varphi S_{\alpha} \rho_o / B_{oi} \quad (8)$$

(2)具有气顶情况下的计算公式。假设油气界面深度为 $-d_1$, 其他条件见纯油藏情况(图 4b)。则石油地质储量计算新公式为

$$N_o = 100DL \cot \beta (d - d_1) \varphi S_{\alpha} \rho_o / B_{oi} \quad (9)$$

天然气地质储量计算公式为

$$G = 0.01 (S_1 + S_2) L \varphi S_{gi} \frac{T_{sc} P_i}{P_{sc} T Z_i} \quad (10)$$

式中: Z_i 为原始天然气偏差系数(%); P_i 为原始地层压力(MPa)。

天然气地质储量的计算分为 3 种情况。

(1)当剥蚀面倾向与地层倾向一致时, 地层不整合遮挡油气藏天然气地质储量计算新公式为

$$G = 0.01DL \cot \beta \left\{ d_1 - \frac{D_2 \cot \beta - D_1 \cot \alpha}{\cot \beta - \cot \alpha} + \frac{D \sin \alpha \cos \beta}{2 \sin(\beta-\alpha)} \right\} \varphi S_{gi} \frac{T_{sc} P_i}{P_{sc} T Z_i}$$

$$\frac{D \sin \alpha \cos \beta}{2 \sin (\beta - \alpha)} \varphi S_{gi} \frac{T_{sc} P_i}{P_{sc} Z_i T} \quad (11)$$

(2) 当剥蚀面倾角 $\alpha = 0$ 时, 地层不整合遮挡油气藏天然气地质储量计算新公式为

$$G = 0.01 D L \cot \beta (d_1 - D_1) \varphi S_{gi} \frac{T_{sc} P_i}{P_{sc} Z_i T} \quad (12)$$

(3) 当剥蚀面倾向与地层倾向相反时, 地层不整合遮挡油气藏天然气地质储量计算新公式为

$$G = 0.01 D L \cot \beta \left[d_1 - \frac{D_3 \cot \beta + D_1 \cot \alpha}{\cot \beta + \cot \alpha} + \frac{D \sin \alpha \cos \beta}{2 \sin (\beta + \alpha)} \right] \varphi S_{gi} \frac{T_{sc} P_i}{P_{sc} Z_i T} \quad (13)$$

1.3.3 新方法的特点及应用条件

与传统的容积法相比, 新方法计算简单方便, 理论性更强, 存在的不确定因素显著减少, 只需要注意如下几点。

(1) 研究区构造落实, 至少有 1 口探井, 具有测井资料及计算单储系数时所需的参数资料。

(2) 砂体发育较为稳定, 如三角洲前缘亚相沉积等。根据胜利油田地层不整合遮挡油气藏的勘探实践, 一般满足该条件。

(3) 在多个砂体含油情况下, 应分别加以计算, 最后求和。

(4) 如果剥蚀面局部有起伏, 应单独对异常区进行计算。

2 储量计算新方法在高青油田高 424 块的应用

2.1 高青油田高 424 块地质特征

2.1.1 高 424 块构造特征

高青油田高 424 块位于济阳拗陷青城凸起的北部斜坡带, 主要含油层系为下第三系沙四段, 为典型的地层不整合遮挡油气藏: 沙四段地层整体形态为一个南高北低的单斜, 内部被断层切割复杂化, 地层产状较陡, 地层倾角为 $7^\circ \sim 12^\circ$, 上第三系馆陶组泥岩直接覆盖于沙四段地层之上, 形成角度不整合接触, 来自博兴洼陷沙三中下亚段和沙四上亚段的大量油气沿着断层、不整合面及三角洲前缘砂体运移到沙四段构造高部位聚集, 形成地层不整合遮挡油气藏^[14]。剥蚀面(馆陶组底)整体形态南高北低, 地层倾角约 2° , 局部有起伏(图 5)。

2.1.2 高 424 块沉积相及砂体展布

高 424 块沙四段以三角洲沉积、三角洲前方的滩坝砂岩沉积和半深湖—深湖泥岩沉积为主, 根据地震、测井曲线和岩性特征将高 424 块沙四段地层

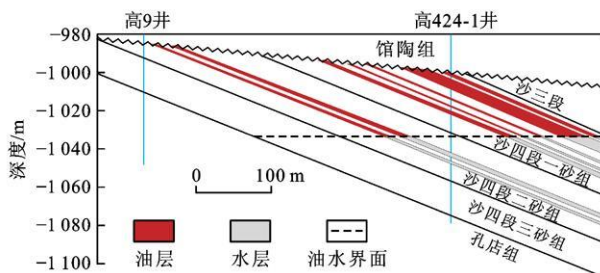


图 5 高青油田高 424 块高 9—高 424-1 井南北向油藏剖面
Fig. 5 North-south Reservoir Profile from Well Gao9 to Well Gao424-1 in Block Gao424 of Gaoqing Oilfield

划分为 3 个砂组。其中一砂组砂体发育, 沉积微相以水下分流河道、河口砂坝为主, 砂地比达到 0.75 以上, 在高 424 块以北的高斜 73 地区砂体叠加厚度超过 70 m, 由于剥蚀作用, 高 424 块沙四段一砂组砂体残余厚度 0 ~ 20 m。二砂组地层厚度 0 ~ 30 m, 以位于三角洲前方的滩坝砂为主, 砂体厚度 0 ~ 8 m, 砂地比小于 0.4。三砂组为半深湖—深湖泥岩沉积, 地层厚度 0 ~ 20 m, 砂体不发育。高 424 块沙四段储层岩性以细砂质粉砂岩为主, 平均孔隙度为 32.7%, 渗透率为 $319.7 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 含油饱和度为 56%。

2.1.3 高 424 块流体物性

沙四段地面原油密度 $0.9637 \sim 0.9687 \text{ g/cm}^3$, 平均 0.9654 g/cm^3 , 地层原油黏度 $1231 \sim 2181 \text{ MPa} \cdot \text{s}$, 属于稠油, 地层原油压缩系数 1.07。计算单储系数为 $16.5 \times 10^4 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{m})$ 。

2.2 储量计算新方法在高青油田高 424 块的应用

2.2.1 计算高 424 块石油地质储量

采用储量计算新方法对高 424 块高 424-1 井区沙四段储量进行了计算, 该井区剥蚀面倾向与地层倾向一致, 无气顶, 采用储量计算新公式中的式(6)进行计算。

计算所用参数及计算结果如表 1, 计算高 424-1 井区沙四段 7 个砂体石油地质储量为 $102.19 \times 10^4 \text{ t}$ 。该井区实施产能建设后, 采用储量计算新方法上报探明石油地质储量 $103.5 \times 10^4 \text{ t}$, 与勘探初期计算结果误差率仅为 1.3%, 说明该方法适用于地层不整合遮挡油藏的石油地质储量计算。

2.2.2 预测高 424 块水平井钻遇油层厚度

根据高 424-1 井钻遇储层情况, 假设设计的水平井与剥蚀面平行, 且垂直地层走向, 则钻遇沙四段最大油层厚度为

$$L' = \sum_{i=1}^n \frac{D_i \cot \beta}{\cos \alpha}$$

表 1 高青油田高 424 块高 424-1 井区沙四段石油地质储量计算参数

Tab. 1 Parameter for Calculating Geological Reserves in the Fourth Member of Shahejie Formation of Well Gao424-1 of Block Gao424, Gaoqing Oilfield

砂体 编号	砂体顶深/ km	砂体底深/ km	砂体铅直 厚度/ m	单储系数/ (10 ⁴ t · km ⁻² · m ⁻¹)	油层横向 分布长度/ m	钻遇剥蚀面 深度/ km	剥蚀面 倾角/ (°)	目的层地层 倾角/ (°)	油水界面 深度/ km	石油地质 储量/ 10 ⁴ t
1	1.000 8	1.002 6	1.8	16.5	1 760	0.999	2	9	1.032	11.14
2	1.003 8	1.008 8	5.0	16.5	1 760	0.999	2	9	1.032	32.15
3	1.013 7	1.014 9	1.2	16.5	1 760	0.999	2	9	1.032	8.21
4	1.017 7	1.018 5	0.8	16.5	1 760	0.999	2	9	1.032	5.63
5	1.020 2	1.022 1	1.9	16.5	1 760	0.999	2	9	1.032	13.68
6	1.043 5	1.045 9	2.4	16.5	1 760	0.999	2	9	1.032	20.21
7	1.047 3	1.048 6	1.3	16.5	1 760	0.999	2	9	1.032	11.17

式中: L' 为水平井钻遇油层厚度 (m); D_i 为单砂体铅直厚度 (m)。

计算高 424-1 井区水平井钻遇沙四段一、二砂组油层厚度为 91 m。后期完钻的水平井高 424 平 2 井(高 424-1 井以西 300 m)钻遇油层厚度 98.9 m, 误差率仅为 7.9%, 预测效果好。

3 结 语

(1)在勘探的早期阶段, 由于各区带的含油范围比较难圈定, 油层厚度不一, 且地层不整合遮挡油气藏一般有多个砂体含油, 容积法在进行表征叠合含油面积、叠加油层厚度时地质意义不显著, 计算繁琐, 不确定因素较多。

(2)从几何学的观点出发, 对容积法加以改进, 采用单储系数、横截面面积与油层横向分布长度三者乘积的方式, 针对纯油藏和具有气顶的油气藏两种情况, 提出相应的地层不整合遮挡油气藏地质储量计算新公式, 并根据该类油气藏的特点提出水平井钻遇油气藏厚度的预测公式。与传统的容积法相比, 新方法计算简单方便, 理论性更强, 存在的不确定因素显著减少。

(3)采用新方法在高青油田高 424 块高 424-1 井区进行实践应用。该井区实施产能建设后, 上报探明石油地质储量与勘探初期计算结果误差率为 1.3%, 水平井实际钻遇油藏厚度与计算结果误差率为 7.9%, 实践表明该方法适用于地层不整合遮挡油气藏的地质储量计算及预测水平井钻遇油气藏厚度。

参考文献:

[1] 潘元林, 张善文, 肖焕钦, 等. 济阳断陷盆地隐蔽油气藏勘探 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2003.

[2] 沈武显, 樊太亮, 宫 雪, 等. 陆相压性浅水湖盆隐蔽油气藏勘探实践 [J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2010, 32(2): 73-78.

[3] 熊 伟. 济阳拗陷地层型油气藏成藏模式探讨 [J]. 油气地球物理, 2005, 3(2): 46-51.

[4] 郝 芳, 邹华耀, 方 勇. 隐蔽油气藏研究的难点和前沿 [J]. 地质前缘, 2005, 12(4): 481-488.

[5] 李晓燕, 蒋有录, 陈 涛. 古风化壳孔隙与裂缝发育特征及其油气地质意义 [J]. 地球科学与环境学报, 2010, 32(1): 60-64.

[6] 吴孔友, 查 明, 柳广弟. 准噶尔盆地二叠系不整合面及其油气运聚特征 [J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(2): 53-57.

[7] 卓勤功, 隋风贵, 银 燕, 等. 济阳拗陷地层油气藏油气运移动力与方式探讨 [J]. 油气地球物理, 2006, 4(4): 36-40.

[8] 付 广, 段海凤, 孟庆芬. 不整合及输导油气特征 [J]. 大庆石油地质与开发, 2005, 24(1): 13-16.

[9] 陈 涛, 蒋有录, 宋国奇, 等. 不整合研究中的化学风化指标 [J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2009, 31(1): 41-44.

[10] 孙永壮. 东营凹陷南斜坡地层油藏成藏规律 [J]. 油气地质与采收率, 2006, 13(4): 52-54.

[11] 蒋有录, 查 明. 石油天然气地质与勘探 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2006.

[12] 刘吉余, 王立东, 马志欣. 容积法储量计算的两种算法比较 [J]. 海洋地质动态, 2008, 24(3): 40-42.

[13] 于润涛, 刘吉余, 梁东河. 利用三角网法计算油气储量 [J]. 大庆石油学院学报, 2004, 28(5): 7-9.

[14] 司学强, 张金亮. 高青油田北区沙四段沉积特征与油气富集条件 [J]. 特种油气藏, 2006, 13(6): 22-24.