

文章编号:1673-5005(2011)05-0001-05

济阳坳陷桩西古潜山储层裂缝的分形特征

周廷全¹, 陈俊侠²

(1. 中国地质大学 能源学院, 北京 100083; 2. 河南理工大学 资源环境学院, 河南 焦作 454003)

摘要:依据分形理论,以岩心裂缝密度和裂缝容量维关系研究为桥梁,利用断裂的分形特征,对济阳坳陷桩西古潜山碳酸盐储层裂缝进行定量分析,并结合研究区钻井的油气显示情况,确定桩西潜山的裂缝分维值门槛,据此对桩西古潜山储层的裂缝有利区域和含油气范围进行预测。结果表明:桩西潜山 T_{g_1} 地震反射层断裂构造分维值为 1.3174,相关系数 R^2 超过 0.99,下古生界 16 块岩心上裂缝的容量维线性回归相关系数大于 0.97,可用分数维 D 值来比较与评价桩西古潜山裂缝性储层中裂缝的发育程度和裂缝系统的复杂程度,定量计算该区下古生界裂缝性储层中裂缝的密度;裂缝分维值大于 1.4 的区域为桩西潜山裂缝发育有利区,具有较好的储层物性,是油气聚集有利区,裂缝分维值大于 0.8 且小于 1.4 的区域为裂缝发育较有利区,裂缝分维值小于 0.8 的区域为裂缝发育不利区。

关键词:分形理论; 储层; 裂缝; 济阳坳陷; 桩西古潜山

中图分类号:TE 132; P 618.130 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1673-5005.2011.05.001

Fractal characteristics of fracture in Zhuangxi buried-hill reservoir, Jiyang depression

ZHOU Ting-quan¹, CHEN Jun-xia²

(1. School of Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Resources Environment Institute, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: Based on fractal theory and the relationship between fracture density of core and fault capacity dimension in Zhuangxi buried hill, the fractures in carbonate reservoir were quantitatively analyzed. Combined with the exploitation situation of oil and gas in study area, the limit of fractal dimension in Zhuangxi buried hill was determined. The favorable regions of the fracture and the oil and gas accumulation were predicted in Zhuangxi buried-hill reservoir, Jiyang depression. The results show that the fractal dimension of T_{g_1} seismic reflection layer is 1.3174 and correlation coefficient reached 0.99. Capacity-dimensional linear regression correlation coefficient of the fracture on sixteen cores of Lower Paleozoic is greater than 0.97. Fractal dimension can be used to compare and to evaluate the development degree and the complexity of fracture in Lower Paleozoic fractured reservoirs. The density of fractures was calculated quantitatively in the area under the Paleozoic fractured reservoirs. The region where the fractal dimension is greater than 1.4 is the most favorable area of fracture and favorable area for oil and gas accumulation. The region where the fractal dimension is 0.8–1.4 is more favorable area of fracture. The region where the fractal dimension is less than 0.8 is the negative area of fracture.

Key words: fractal theory; reservoir; fracture; Jiyang depression; Zhuangxi buried hill

桩西潜山从 1979 年桩 82 井于井深 3.6195 km 钻入古生界灰岩地层发现古生界含油构造以来,累积探明石油地质储量近亿吨,成为中国继任丘油田后第二个大型古潜山灰岩油气田。其油气藏类型以潜山内幕的裂缝型油藏为主^[1],该类型油气藏储层类型主要为受断裂构造控制的碳酸盐岩裂缝型储层

以及由此产生的溶蚀型储层^[2],储层预测的难度较大,严重影响着桩西潜山进一步的油气勘探。桩西潜山断裂构造的复杂程度决定了裂缝的发育程度^[3],定量分析桩西潜山内幕断裂构造在平面上的复杂程度是潜山裂缝型储层预测的基础。美籍法国数学家曼德布劳特(Mandelbrot)为研究具有自相似

收稿日期:2010-02-06

基金项目:国家油气专项“十一五”课题(2008ZX05004-003)

作者简介:周廷全(1971-),男(汉族),山东郯城人,高级工程师,博士,主要从事油气地质勘探研究工作。

特征的复杂现象提出了“分形”的概念,并提出用分数维 D 值来定量描述分形的复杂程度^[4]。从 Scholz^[5] 将分形理论应用到断裂研究以来,分形理论在地质学中得到了广泛的应用,它为断裂构造空间分布和几何结构的定量表征提供了新的手段,也为裂缝储层分布的研究提供了新的思路^[4-8]。断层和裂缝是岩石在受力作用下形成破裂或产生位移的一种地质现象,两者在一定标度范围内组成自相似性结构^[9-10],用断层和岩心裂缝的分维值可以定量地描述储层中裂缝的空间发育程度^[11]。笔者借助于分形理论这一工具,对桩西古潜山储层裂缝的分形特征进行研究,并计算 T_{g_1} 层构造图上断裂容量维和下古生界 16 块岩心裂缝信息的分维值,以桩西古潜山取心井的岩心裂缝密度和裂缝容量维关系研究为桥梁,利用断裂的分形特征去研究裂缝的分形特征,同时结合研究区的油气统计情况验证,确定该区的裂缝分维值门槛,据此对济阳坳陷桩西古潜山储层的裂缝有利区域和含油气范围进行预测。

1 地质概况

桩西古潜山地处济阳坳陷、渤中坳陷和埕宁隆起 3 大构造单元的交汇处,属济阳坳陷沾化凹陷东部埕北-五号桩-孤东隆起带中段,西为老河口油田,东北为埕岛油田和渤海海域,南临五号桩油田,南以桩南为界,北部为埕北断层,东西两侧分别是长堤断层和埕东断层(图 1)。研究区下古生界碳酸盐

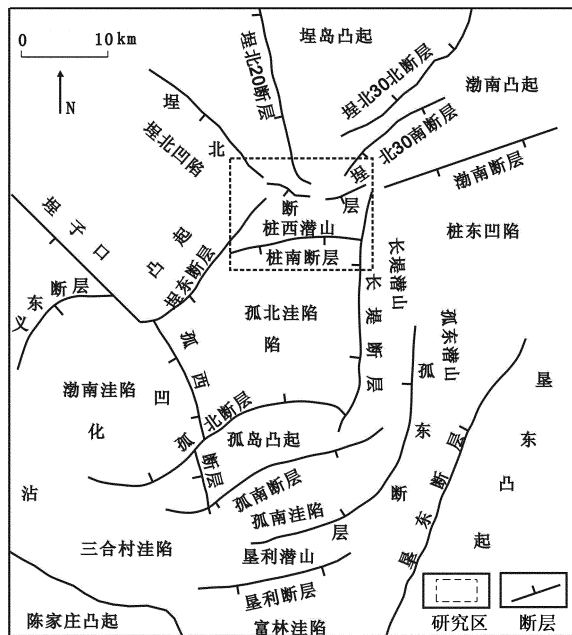


图 1 桩西古潜山位置构造

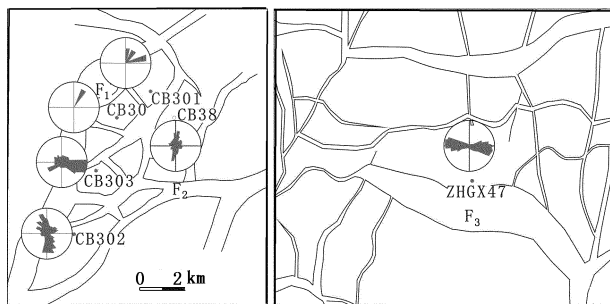
Fig. 1 Structure map of position of Zhuangxi buried hill
岩古潜山的储集能力和油气产量主要受控于碳酸盐

岩裂隙的发育程度,裂隙的产生主要与地质体本身的断裂构造有关,两者系同一应力场下岩石破裂不同程度的产物。

2 桩西古潜山自相似特征

2.1 断层与裂缝展布方向具有自相似性

桩西古潜山 T_{g_1} 反射层断层组合主要受 NNE 向埕东断层、NS 向长堤断层和潜山中部走滑断层 3 条基底断层活动的控制,在走滑断裂带附近派生出一系列的 NE 向雁列状断层组合。走滑断裂带之间由于走滑拉分作用形成一系列近 EW 向的正断层。FMI 解释的裂缝方位亦显示裂缝走向以 NE 向和近 EW 向为主(图 2)。



(a) 埕北30井区

(b) 桩古斜47井区

图 2 钻井 FMI 裂缝走向与井区断裂走向关系

Fig. 2 Relation between FMI fracture strike of drillings and fault strike

结合潜山的断裂组合图发现,埕北 301 井和埕北 30 井位于走向为 NE 的埕北 30 断层 F_1 南部,埕北 301 井裂缝优势走向有 NNE、NE、NEE 向 3 组,其中 NE 向裂缝走向出现概率最大,埕北 30 井裂缝优势走向 NE,裂缝走向与断层走向有很好的一致性。埕北 38 井位于走向 NE 的埕北 30 南 F_2 断层附近,该井岩心裂缝走向 NE。埕北 303 井位于埕北 30 北断层与埕北 30 南断层之间走向近 EW 向的次级断层一侧,该井裂缝走向近 EW 向。桩古斜 47 井南部与北部断层走向近 EW 向,统计岩心裂缝走向发现,裂缝优势走向为近 EW 向。综上所述,每口井的主要裂缝走向与井旁主要断层的走向有很好的一致性,显示了断层和裂缝展布之间存在统计意义上的自相似性。

2.2 断层与裂缝组合形式的相似性

研究区主要断裂,例如东部的长堤断层、潜山中部的断裂和埕东断裂,在 T_{g_1} 反射层均组成北东向右阶羽裂带,每一条次级断裂均表现为剪切走滑特征,与羽裂轴夹角较小,应为走滑构造带的 R 断裂,与 R 断裂共同产出的常有一组走向相近、倾向相反的断

裂,应为走滑带的 P 断裂,这两组断裂在深部切割古生界基底;而近东西向断裂多表现为追踪前期剪切断裂的特征,总体呈锯齿状。例如,长期活动并延续到新近纪的桩南断裂在东部就继承了北东向羽状 R 断裂,而西部则继承了 Ek+Es₄ 期形成的北西向断裂。

对桩西 17 口钻井古潜山碳酸盐岩的裂缝观察发现,桩西古潜山裂缝多为断裂伴生缝。裂隙主要有两类,一类为剪裂隙,往往有两组,另一类为追踪张裂隙,表现为对前期两组剪裂隙的追踪改造(图 3)。断层和钻井岩心裂隙的自相似性说明断裂和裂缝组合系共同的应力场作用的产物。

2.3 断裂和岩心裂缝的分形特征

储集层裂缝系的分布分形计算方法很多,如箱形覆盖法(box-counting method)、康托点集法(Cantor method)等,本文中采用的是易于在计算机上实现的箱形覆盖法来计算断裂的分维值^[11]。依据盒式覆盖法对桩西古潜山 T_{g1} 层断裂构造图进行了不同尺度(网格尺度 $r=1,0.5,0.4,0.25,0.2$ km)网格化及分维值计算,得到该构造图上的断裂分维值为 1.3174,相关系数 R^2 超过 0.99。当盒子的最小尺寸达到最小断裂的长度并且相关系数大于 0.9 时,可以认为符合统计自相似性的要求,因此桩西古潜山断裂具有分形特征。针对桩西钻井下古生界,共计 16 块岩样求取每块岩样照片上裂缝的容量维 D_h ,具体计算过程与求取断裂分维值的过程一致,

只是 r 的取值不同。计算结果如图 4(横坐标为网格边长的对数,纵坐标为网格内裂缝条数的对数)所示。其线性回归相关系数值大于 0.97,所采岩心标本总裂缝分布具有良好的分形特征。所以,可以利用分形理论去预测裂缝的分布规律^[12]。

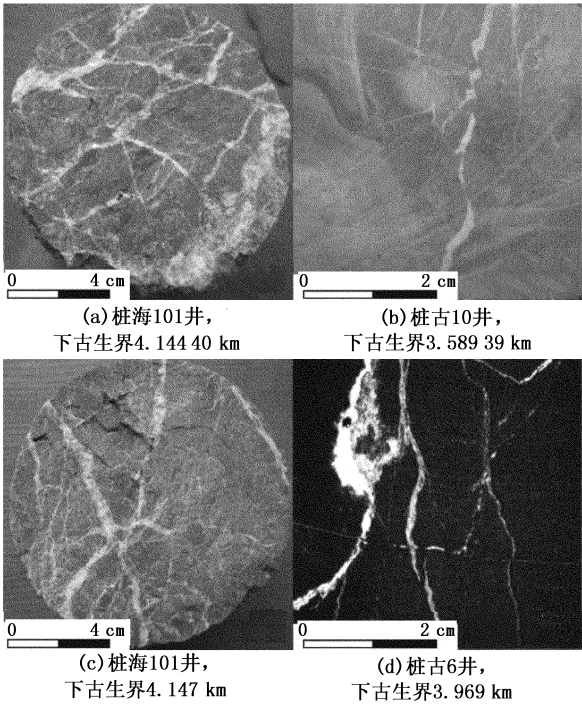


图 3 桩西古潜山碳酸盐岩中的裂缝系统
Fig.3 System of fracture in carbonate rock of Zhuangxi buried hill

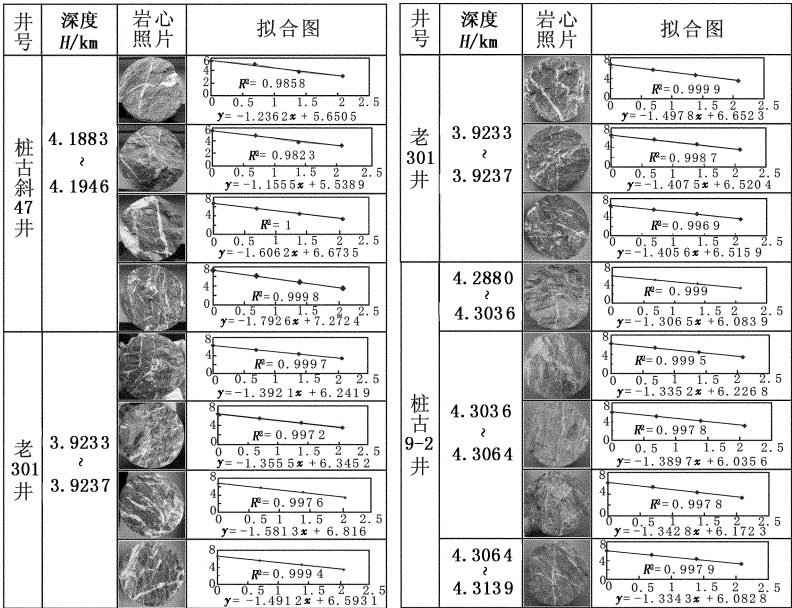


图 4 岩心裂缝容量维求取过程

Fig.4 Process of apply for fracture capacity dimension in core

3 桩西古潜山储层裂缝分布预测

导出研究区中三维数据体的 T_{g1} 层构造图,用 coredrawX4 把该平面图上的断裂矢量化。将该构造图中的断裂以相当于实际边长为 2 km 的网格划分成 120 个子区域,计算出每个子区域的容量维,然后利用 suffer8.0 绘制出平面分布图。

求取每个子区域分维值时,分别采用相同尺度($r=1,0.5,0.4,0.25,0.2$ km)的网格覆盖子区域。图 5 是桩古 22 井所在子区域分维值的求取结果,直线斜率的绝对值 1.541 1 即为该子区域内断裂的容量维。计算出每个子区域的分维值后,绘制出桩西古潜山 T_{g1} 断裂分维平面图(图 6),即 T_{g1} 断裂容量维的等值线,等值线密集区反映了应力变形剧烈的区域,与构造单元具有较好对应关系。

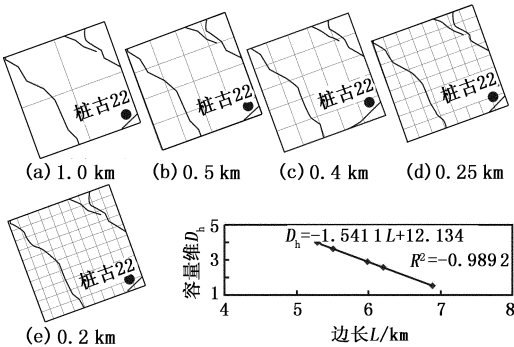


图 5 断裂容量维求取过程

Fig.5 Process of apply for faults capacity dimension

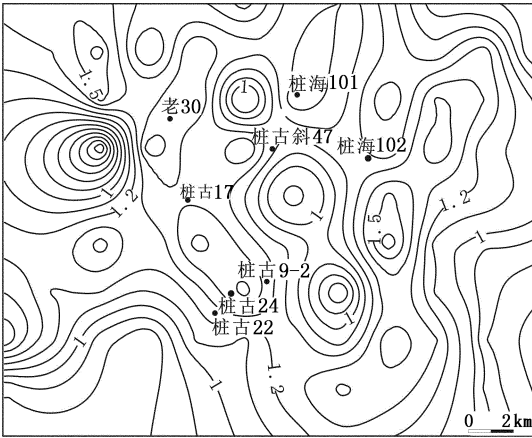


图 6 桩西下古生界断裂容量维平面分布

Fig.6 Plane graph of distribution of faults capacity dimension in lower Paleozoic of Zhuangxi

计算各口井整体取心段裂缝密度(单位横切面上裂缝的条数)的过程中采用了加权平均法,即分别考虑每一块岩样对整个研究井段裂缝密度的贡献。以岩心上裂缝密度为桥梁,将子区域上断裂的

容量维与取心段上的裂缝容量维定量地联系起来,最后将 T_{g1} 构造图上断裂的容量维分布转换为裂缝的容量维分布。对岩心数据进行统计拟合(图 7),岩心上不同井段裂缝密度与相应段裂缝的容量维之间存在如下关系:

$$D_h = -0.0067k^2 + 0.1592k + 0.6626. \tag{1}$$

式中, k 为岩心横剖面裂缝密度,条· m^{-2} 。取心井裂缝的密度与取心井所在的子区域上断裂容量维之间存在如下拟合关系(图 8):

$$k = 23.319D' - 24.14. \tag{2}$$

式中, D' 为子区域上断裂容量维。由式(1)和式(2)即可实现宏观断裂的容量维向微观裂缝的容量维的转换。图 9 为由断裂容量维分布转换的裂缝容量维分布。对比图 6 和图 9 后发现,断裂分维值大的区域,裂缝分维值也高,说明裂缝越发育;反之亦然。

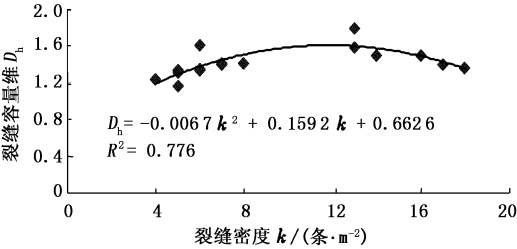


图 7 裂缝面密度与裂缝容量维拟合关系

Fig.7 Fitting relation between fracture face density and fracture capacity dimension

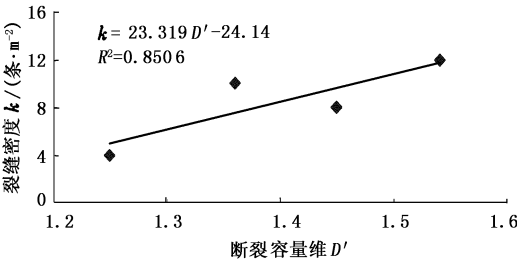


图 8 断裂容量维与裂缝面密度拟合关系

Fig.8 Fitting relation between faults capacity dimension and fracture face density

4 桩西古潜山裂缝分维值与油气分布的关系

研究区内油气显示统计发现,研究区下古生界工业油气流井和油气显示井多在断裂分维值大于 1.4 的区域内,由以上两公式推算的裂缝发育有利区应该是其分维值大于 1.4 的区域,因此将裂缝分维值大于 1.4 的区域定为裂缝发育有利区,裂缝分维值大于 0.8 且小于 1.4 的区域定为裂缝发育较有利区,裂缝分维值小于 0.8 的区域定为裂缝发育不利区。

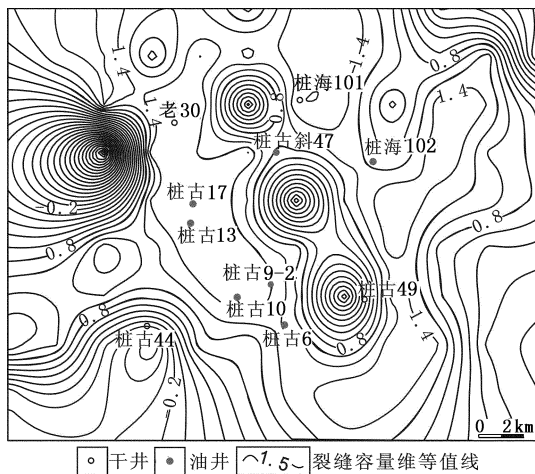


图9 桩西下古生界裂缝有利发育区预测

Fig.9 Prediction graph of fracture favorable zones in lower Paleozoic of Zhuangxi

预测的裂缝发育有利区,断裂丰富,具有较好的储层物性,是油气聚集有利区,结合所掌握的该区生产井的试油情况,发现目前预测3个有探井的有利区块中,1个区块获得了大规模的工业油流,2个区块有油气显示。

图9中显示,所统计的工业油气流井和油气显示井都在裂缝分维值大于0.8的等值线区域内或其附近,这与预测的裂缝发育区吻合较好。裂缝分维值小于0.8的等值线区域即预测的裂缝发育不利区域,试油大都为干层,如桩古8、33、41、50等井,其主要原因是这些井储层裂缝不发育。

5 结 论

(1) 桩西潜山 Tg_1 地震反射层断裂构造与潜山内幕储层空间裂缝在展布方向和组合形式上具有相似性。下古生界顶面构造图上的断裂分维值为1.3174,相关系数 R^2 超过0.99,下古生界16块岩心上裂缝的容量维线性回归相关系数大于0.97。可用分数维 D 值来比较与评价桩西古潜山下古生界裂缝性储层的裂缝发育程度和裂缝系统的复杂程度,定量计算裂缝的密度。

(2) 裂缝分维值大于1.4的区域为桩西潜山裂缝发育有利区,具有较好的储层物性,是油气聚集有利区;裂缝分维值大于0.8且小于1.4的区域为裂缝发育较有利区;裂缝分维值小于0.8的区域为裂缝发育不利区。

参考文献:

- [1] 李丕龙,张善文,王永诗,等.多样性潜山成因、成藏与勘探:以济阳坳陷为例[M].北京:石油工业出版社,2003:132-133.
- [2] 王永诗.桩西-埕岛地区下古生界潜山储集层特征及形成机制[J].岩性油气藏,2009,21(1):11-14.
WANG Yong-shi. Characteristics and forming mechanism of buried hill reservoir of lower Paleozoic in Zhuangxi-Chengdao area[J]. Lithologic Reservoirs, 2009, 21(1): 11-14.
- [3] 苏玉平,吕延防,付晓飞,等.分形理论在贝尔凹陷基岩潜山裂缝预测中的应用[J].吉林大学学报:地球科学版,2006,36(4):563-569.
SU Yu-ping, LÜ Yan-fang, FU Xiao-fei, et al. Application of fractal theory on the fracture prediction in the buried hill of bed rock in beier depression[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2006, 36(4): 563-569.
- [4] MANDELROT B B. The fractal geometry of nature[M]. San Francisco: W H Feeman & Co, 1982.
- [5] SCHOLZ C H, AVILES C A. Fractal dimension of the 1906 san Andreas fault and 1915 Pleasant Valley fault (abstract) [J]. Earth Quakes Notes, 1985, 55(6): 20-24.
- [6] 曾联波,金之钧,李京昌,等.柴达木盆地北缘断裂构造分形特征与油气分布关系研究[J].地质科学,2001,36(2):241-247.
ZENG Lian-bo, JIN Zhi-jun, LI Jing-chang, et al. Fractal characteristics of fractural structures and its relation to oil-gas distribution in North Qaidam Basin[J]. Scientia Geologica Sinica, 2001, 36(2): 241-247.
- [7] 何光明,高如曾.分形理论在裂缝预测中的尝试[J].石油物探,1993,32(2):11-13.
HE Guang-ming, GAO Ru-zeng. Fracture prediction based on fractal theory[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 1993, 32(2): 11-13.
- [8] TAKAYUKI Hirata, TAKASHI Satoh, KEISUKE Ito. Fractal structure of spatial distribution of microfracturing in rock [J]. Geophysical Journal International, 1987, 90(2): 369-374.
- [9] 姚光庆,蔡忠贤.油气储层地质学原理与方法[M].武汉:中国地质大学出版社,2005:11.

(下转第13页)