

引用格式: 梁孝柏, 鞠玮. 基于拓扑结构分析的断层连通性评价——以川南泸州中区深层页岩气储层多级断层为例[J]. 油气藏评价与开发, 2024, 14(3): 446-457.

LIANG Xiaobai, JU Wei. Fault connectivity evaluation based on topological structure analysis: A case study of multi-stage faults of deep shale gas reservoirs in central Luzhou Block, southern Sichuan[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2024, 14(3): 446-457.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2024.03.014

基于拓扑结构分析的断层连通性评价

——以川南泸州中区深层页岩气储层多级断层为例

梁孝柏^{1,2}, 鞠玮^{1,2}

(1. 中国矿业大学煤层气资源与成藏过程教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116;

2. 中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 川南深层页岩气是中国天然气增储上产的重要领域。断层连通性是影响深层页岩气储层渗透性能、单井产能的重要因素, 前期多针对断层形态、组合样式开展研究, 鲜有断层连通性的系统化评价。研究以川南泸州中区五峰组页岩气储层多级断层为研究对象, 利用拓扑结构分析方法研究断层网络拓扑结构, 并对其连通性进行定量评价, 结果显示: 泸州中区五峰组断层发育, 断层网络分支的平均连接点数为 1.12, 可形成高渗通道, 有利于页岩气的运移。研究区中部及南部断层产状分散度、断层长度分散度和断层密度均较大, 连接型节点、分支数量多, 有利于提高断层连通性, 其连通性评价结果优于其他区域, 具备一定的潜在高产井可能。

关键词: 泸州中区; 深层页岩气; 连通性评价; 拓扑结构; 断层网络

中图分类号: TE12

文献标识码: A

Fault connectivity evaluation based on topological structure analysis: A case study of multi-stage faults of deep shale gas reservoirs in central Luzhou Block, southern Sichuan

LIANG Xiaobai^{1,2}, JU Wei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Coalbed Methane Resources & Reservoir Formation Process, Ministry of Education, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 2. School of Resources and Earth Sciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: Deep shale gas reserves in southern Sichuan represent a significant opportunity for augmenting China's natural gas reserves and production. One critical factor influencing the permeability and productivity of individual wells in these deep shale gas reservoirs is fault connectivity. Previous research has primarily focused on fault morphology and combination styles, with little systematic quantitative assessment of fault connectivity. This study targets the Wufeng Formation reservoir in the central Luzhou section of the southern Sichuan Basin, initiating a detailed analysis of the fault network structure and connectivity using multiple faults as reference points. Findings indicate that faults in the Wufeng Formation of the central Luzhou area are well-developed, with an average of 1.12 connection points per branch network. These networks potentially form highly permeable channels favorable for shale gas transport. The central and southern parts of the study area exhibit higher fault dispersion, fault length dispersion, and fault density, which contribute to a greater number of connecting nodes and branches. This enhanced connectivity is conducive to the development of high-production wells. The connectivity assessment results from these regions are superior to other studied areas, indicating notable potential for high-yield well development in the Wufeng Formation.

Keywords: central Luzhou Block; deep shale gas; connectivity evaluation; topological structure; fault network

收稿日期: 2023-05-22。

第一作者简介: 梁孝柏(2000—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事油气储层地应力场与裂缝预测研究。地址: 江苏省徐州市大学路1号中国矿业大学南湖校区资源与地球科学学院, 邮政编码: 221116。E-mail: TS22010053A31@cumt.edu.cn

通信作者简介: 鞠玮(1988—), 男, 博士, 副教授, 主要从事非常规油气储层地应力学教学与教研。地址: 江苏省徐州市大学路1号中国矿业大学南湖校区资源与地球科学学院, 邮政编码: 221116。E-mail: wju@cumt.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目“页岩储层甲烷原位燃爆压裂理论与技术”(2020YFA0711800)。

全球能源发展已经进入了从化石能源到新能源转变的关键时期,页岩气是一种洁净的化石能源,在中国能源开发和利用中所占的比例正在逐步增加^[1]。四川盆地南缘的五峰组—龙马溪组是一套在中国南方已获得商业化开采的海相页岩气地层,其油气资源储量巨大。目前,中国东部地区已形成长宁、威远和昭通等多个页岩气商业区,页岩气勘探开发工作正在向泸州中部和渝西等深部页岩气区方向发展^[2]。泸州、渝西地区已有50多口探井,其中,L203和H202深部气井获得高产页岩气工业气流分别为 137.9×10^4 、 22.37×10^4 m³/d,说明深部页岩气具有极大的资源潜力^[3]。

对页岩储层而言,基质孔隙已基本不具备有效渗透条件,断层系统是油气运移的有效通道^[4-10]。断层系统是控制油气藏形成和保存的主要地质因素,对成藏主要控制因子的控制率在70%以上,油气藏主要沿着断层或在断层周围^[11-14]。孙东等^[15]通过哈拉塘地区走滑断层构造解析,发现断层交汇区裂缝最为发育,是寻找高效井的理想场所。何羽等^[16]运用高精度数据,对该区小断层系统特征、活动期次和动力成因进行了研究,提出了“小断层”是联系油源、控制油气运移、聚集和富集的关键环节,并对其所伴随的断层进行了改造,从而提高了致密储层物性的观点。陈永波等^[17]认为断层作用使百口泉组储层构造裂隙可使储集层渗透性能得到有效改善。康晏等^[18]利用油气运聚数值模拟软件,结合油源和储层条件,在研究青城凸起断层特征和连通性的基础上,耦合供烃强度、运移动力和输导性能,对明化镇组沉积末期油气运聚特征进行模拟分析。杨同振^[19]应用断层连通概率法量化表征了东营北带胜坨地区主要断层输导体的启闭性,并依据烃源岩生排烃强度、古流体势分布与输导体输导性能的叠合,综合分析了输导体系的有效性和油气运聚规律。

针对断层连通性研究,李玮等^[20]通过建立页岩裂缝组裂缝尺寸、裂缝数量的分形描述模型,成功地揭示了裂缝网络的特征和性质,并进一步研究了多种计算模型。KIM等^[21]研究断层弯曲折叠过程中断层网络和连接的演变,结果表明,断层网络的演变、连通性和流体流动特性可以通过仔细解释断层-弯曲折叠系统形成过程中的折叠机制和相关应变状态来表征。赵欢^[22]结合分形理论及拓扑方法,应用蒙特卡罗模拟方法和概率分布函数,建立了天然裂缝网络模型及节点模型,并在此基础上分析了天然裂

缝节点类型,天然裂缝连通性及其影响。王迪等^[23]运用拓扑结构分析方法,研究发现不同层位的断层网络体系具有不同的复杂程度分布特征,并与油气运移存在一定的关系。此外,研究还发现断层交互与拓扑结构高值的区域存在良好的耦合性,表现为较好的连通性。王希贤^[24]认为分形维数与地质体的连通性有一定关系,当分形维数低于1.38时,地质体连通性较低,反之,地质体连通性较高。南佳琛等^[25]对不同井的原油样品进行色谱分析并建立色谱指纹参数,用参数对之间的相似性和差异性来判别井间流体的相似度,进而对油藏的连通性进行判断。GHOSH等^[26]从地质的角度对裂缝连通性进行了分析,认为裂缝连通性与裂缝组数量及裂缝分散度相关。RUBINO等^[27]采用微地震测试方法,根据不同裂缝形态所采集的地震能量不同这一特性,根据微地震能量的变化,对裂缝的连通性进行描述。

川南泸州中区五峰组页岩气资源丰富,但前期多针对断层构造样式进行研究,对断层连通性未给予充分重视。本次研究以五峰组深层页岩气储层发育的多级断层为研究对象,通过拓扑结构分析研究其连通性,以期对研究区页岩气效益开发提供地质参考。

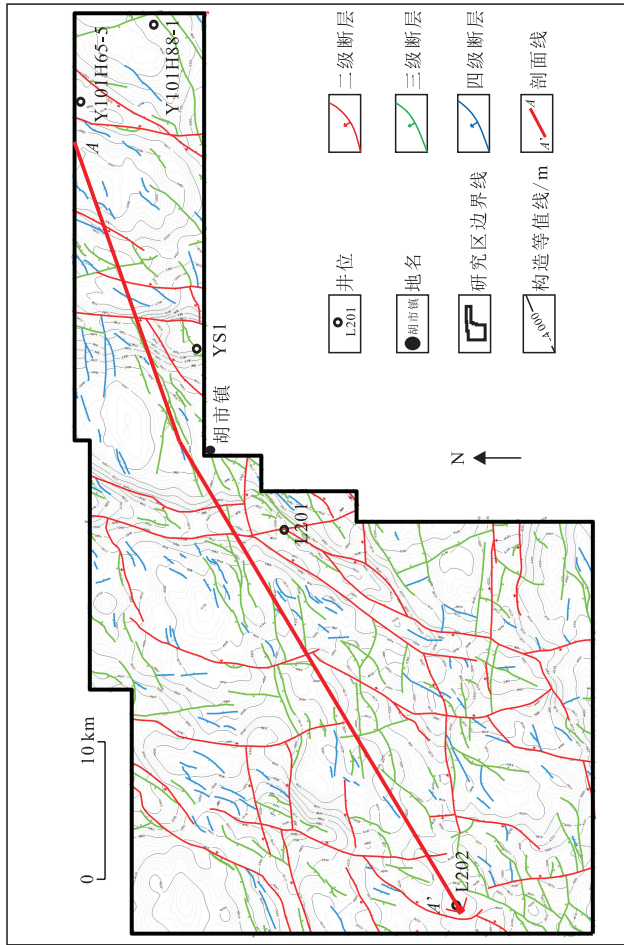
1 地质背景

四川盆地经历多期构造运动,具有复杂的褶皱和断层系统,根据构造特征可以将其划分为6个构造带^[28-30],泸州地处川南低陡构造带上且位于华蓥山断裂带南段南侧^[31]。研究区内发育多条基底断裂,川南低陡构造带主要发育北东—南西向华蓥山断裂带以及近东—西向纳溪断裂带,华蓥山断裂带纵跨川中低陡构造带及川南低陡构造带,周围多发育同走向断层,纳溪断裂带主要发育在川南低陡构造带的南部,周围伴生发育有较多近东西向断裂^[32-33]。两条大断裂伴生的同走向断层造成泸州中区断层走向呈北东—南西向或接近东—西向(图1)。

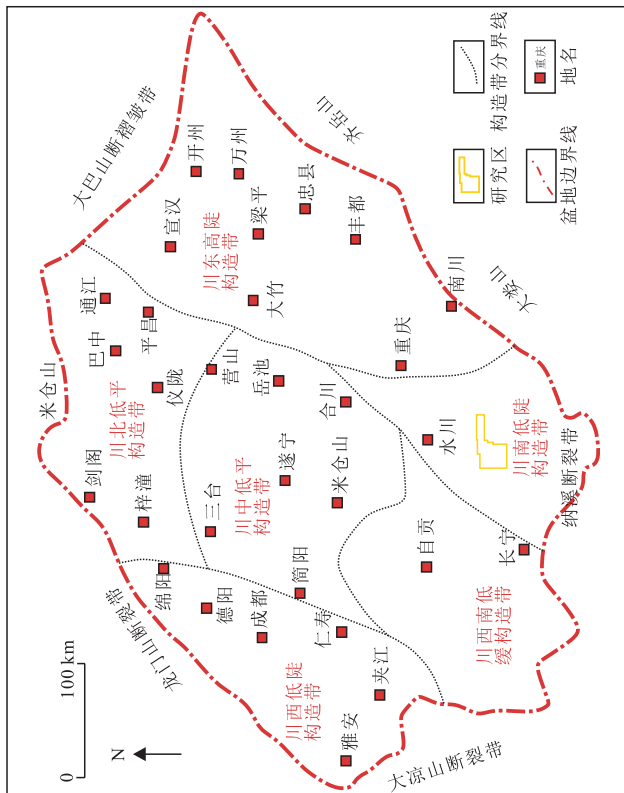
2 断层系统拓扑结构的基本参数及模型构建

2.1 拓扑结构基本参数

SANDERSON等^[34]讨论了拓扑学在断层网络和拓扑术语表征中的应用。李玮等^[35]认为断层系统在



b. 泸州中区断层分布



a. 四川盆地构造单元划分

图1 四川盆地构造带单元划分及泸州中区断层分布
Fig. 1 Division of tectonic zone units in the Sichuan Basin and fault distribution in central Luzhou Block

二维网络中表现为一系列的线段和节点的组合。每条断层在二维网络中都有各自的1条线段和2个节点,1条线段上或存在与另外1条线段相交的节点或不相交而没有节点。节点与分支2个元素共同构成断层网络系统的拓扑特征^[36-39]。SANDERSON等^[40]认为任何线都可以呈现为末端有节点的1个或多个分支。节点可以划分为3种类型,可以是被孤立的I型节点,可以是形成分支的Y型节点,或是构成2条相交线的交点(X型节点)。X型节点和Y型节点形成连接,称为连接节点。分支是任何2个节点之间的1条线段的一部分。因此,分支可以连接:①2个孤立的节点(I-I),在这种情况下,它被称为孤立的分支;②孤立和连接节点(I-X或I-Y),称为部分连接分支(I-C);③2个连接节点(X-X,X-Y或Y-Y),称为连接分支(C-C)(图2)。

2.2 模型构建

研究借助QGIS软件的2次开发研究断层系统的特征及连通性。该工具的功能包括数字化、抽样、几何分析、拓扑结构分析。图3为研究模型构建流程图,将流程分为两大部分,分别是数据分析和数据可视化。第一部分数据分析最为重要,将泸州中区断层图像转换为矢量图并准确地输入到工具中,为数据分析提供真实、精确的数据资料。第二部分数据分析可以分成5个小步骤:①输入泸州中区断层矢量图并划定解释边界;②制定抽样规则,采取的是距离为1.43 km,南东向15°的等间距抽样规则;③根据解释边界制作网格,采用网格长度为0.57 km,采样半径为

1.14 km的网格;④根据前面的数据、边界、网格来进行断层网络的几何、拓扑分析;⑤再对几何及拓扑分析出来的结果进行空间可视化。

3 断层系统特征

根据川南地区页岩气断层划分标准,将研究区的断层划分为四级断层。一级断层是控制背斜或向斜边界的断层,断距大于300 m。二级断层是对局部构造发育和形成断层起控制作用的断层,断距100~300 m(图1b和图4红色断层)。三级断层是对局部断块、圈闭、高点起控制作用的断层,断距40~100 m(图1b和图4绿色)。四级断层为伴生断层、小断层等,断距20~40 m(图1b和图4蓝色)。

泸州中区断层构造主要有北北东—南南西向、北东—南西向和近东—西向(图1b)。区内发育雷口坡组—嘉陵江组膏岩盐、志留系页岩、寒武系高台组膏岩3套滑脱层(图4紫色部分)。滑脱层与硬地层的组合关系使纵向上发育地表至三叠系、三叠系至二叠系、志留系至寒武系3套断层系统,五峰组断裂数量较多,绝大部分的断层为逆断层,且以二级、三级断层为主(图4)。

在此基础上,分析川南泸州中区五峰组页岩气储层断层发育分布特征,其走向介于北东向20°~80°之间,绝大多数介于北东向70°~80°(图5b)。为尽可能垂直于断层走向,降低重复采样,研究设置了6条间距为1.43 km以及方位为南东向15°的等距离采样线(图5a)。根据断层特征的线累积频数(图5c),

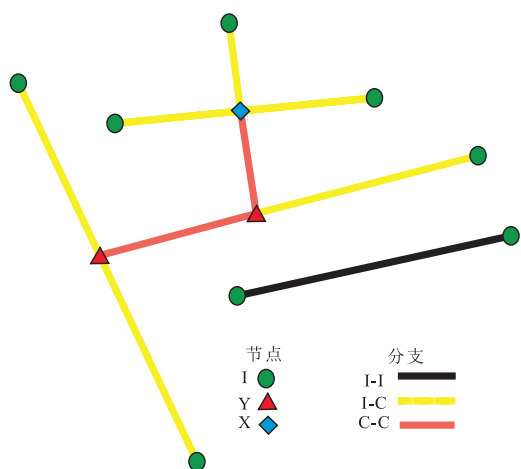


图2 拓扑结构中的基本参数

Fig. 2 Basic parameters in the topological structure

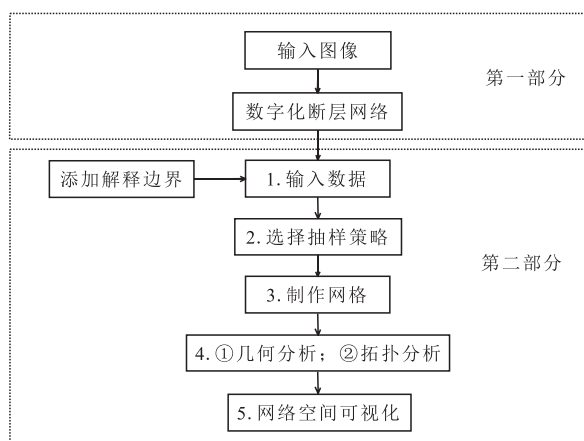


图3 模型构建流程

Fig. 3 Model construction process

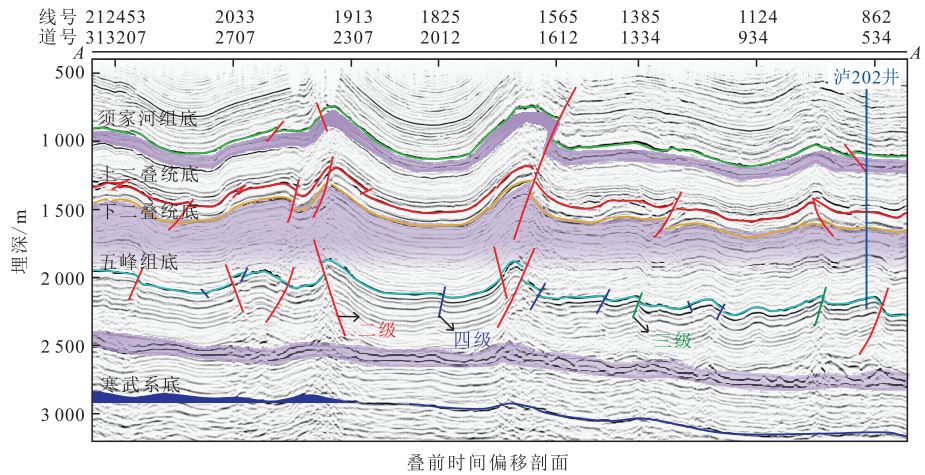


图4 叠前时间偏移剖面(剖面线见图1b)

Fig. 4 Pre-stack time offset section(see Fig. 1b for section lines)

发现与3、4号采样线相交的断层数量较多。断层长度分布介于0~4.58 km,绝大多数介于0.85~1.43 km(图5d)。

4 断层系统拓扑分析及连通性评价

4.1 拓扑结构分析

在研究区内,I、Y、X型节点类型的数量分别为489个、179个、22个,百分比分别为70.9%、25.9%、3.2%,连接型节点(Y型、X型)数量占比将近30%(图6a)。研究区小断层的数量较多,因此,I型节点数量占比比较大。图6b中,C-C、C-I、I-I型分支类型的数量分别为203条、219条、135条,百分比分别为36.4%、39.3%、24.3%,连接型分支(C-I型、C-C型)数量占比为75.7%,表明研究区断层网络的连通性良好。

以上统计分析需要注意的是:根据节点类型数量占比评价断层网络连通性存在片面性,应依据节点类型数量占比与分支类型数量占比综合评价断层网络连通性。

I型节点在研究区所占范围比连接型节点范围广,颜色最红的区域表示对应节点类型相对集中。I型节点相对集中在研究区的中部及北部,Y型节点相对集中在研究区的中部及南部,X型节点相对集中在研究区的南部。连接型分支在研究区所占范围比I-I分支类型范围广,颜色最红的区域表示对应分支类型相对集中。C-I分支类型相对集中在研究区的中部及南部,C-C分支类型相对集中在研究区的中

部及南部,I-I分支类型相对集中在研究区的中部及北部。连接型节点都集中在研究区的中部及南部,其断层连通性比北部的连通性好(图7)。

分析节点和分支频数(图7d、7h)可知:共同点为节点及分支都共同集中在研究区的中部;不同点为研究区的中部及北部的节点比南部集中,研究区的中部及南部的分支比北部集中。分析其原因在于研究区北部分布数量较多且相对分散的小断层,南部断层数量相对于北部少,但分布相对集中。

4.2 连通性评价

在研究区断层网络的拓扑结构分析结果基础上,利用各节点数或者各分支数来计算分支的平均连接点数。

第一种方法,李玮等^[35]利用各节点数计算出分支的平均连接点数。在二维裂缝网络中,1条裂缝有2个末端节点,可能是I型节点,或者Y型节点。因此,裂缝网络中的裂缝数为:

$$N_B = \frac{1}{2} [N_I + 3(N_Y) + 4(N_X)] \quad (1)$$

式中: N_B 为分支数,单位条; N_I 为I型节点数,单位个; N_Y 为Y型节点数,单位个; N_X 为X型节点数,单位个。

每个Y型节点具有将3个分支连接的特点,每个X型节点具有将4个分支连接的特点,因此,分支的平均连接点数 C_B 的关系式为:

$$C_B = \frac{(3N_Y + 4N_X)}{N_B} \quad (2)$$

结合式(1)、式(2),得:

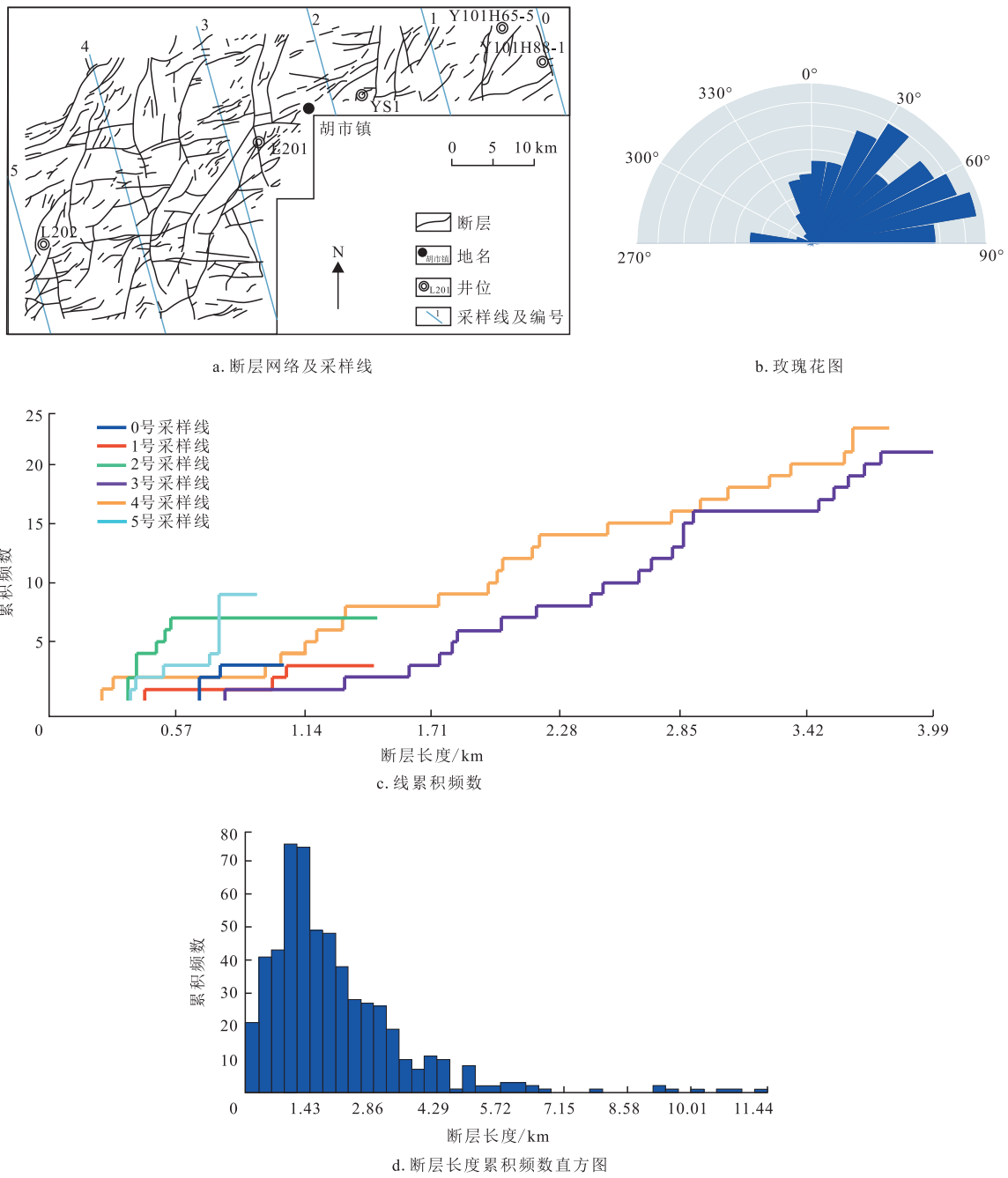


图5 川南泸州中区五峰组断层系统几何分析

Fig. 5 Geometric analysis of fault system of Wufeng Formation of central Luzhou Block, southern Sichuan

$$C_B = \frac{2(3N_Y + 4N_X)}{N_I + 3N_Y + 4N_X} \quad (3)$$

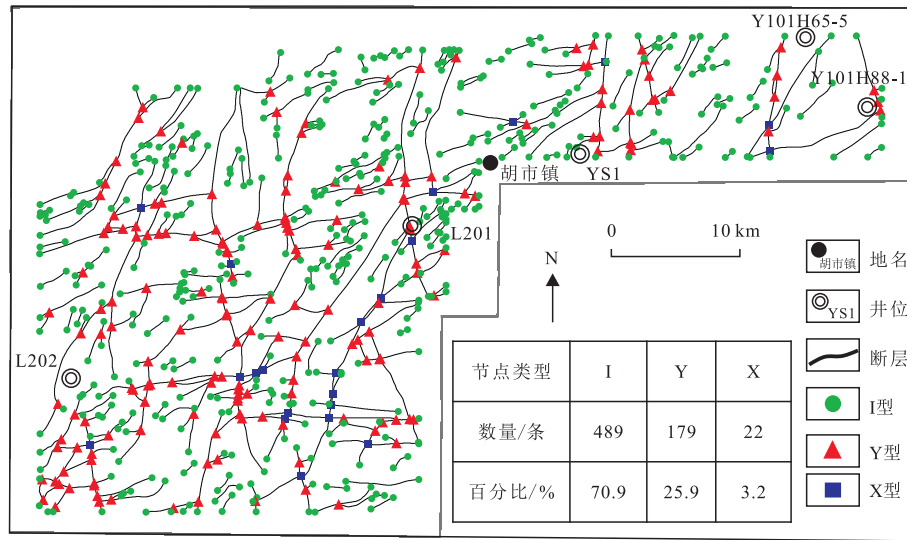
式(2)一式(3)中: C_B 为断层网络分支的平均连接点数,单位个/条。

通过公式(3),计算得出断层网络分支的平均连接点数 C_B 为1.12。

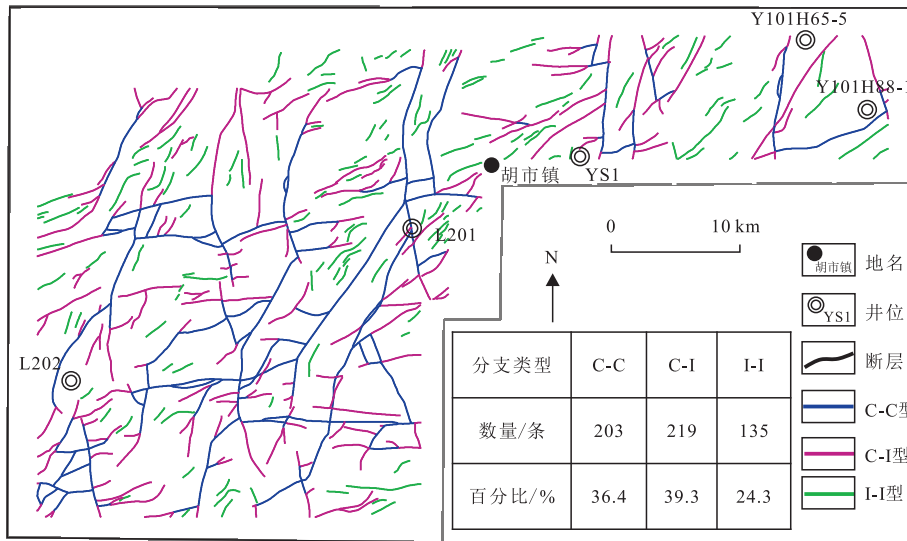
第二种方法,利用各分支数计算分支的平均连

接点数。每条C-I型分支存在1个连通节点即X型节点或者Y型节点,每条C-C型分支存在2个连通节点即2个X型节点或者1个X型和Y型节点或者2个Y型节点。由此得出计算分支的平均连接点数公式(4):

$$C_B = \frac{N_{CI} + 2N_{CC}}{N_{CI} + N_{CC} + N_{II}} \quad (4)$$



a. 节点类型



b. 分支类型

图6 节点和分支类型数量及百分比

Fig. 6 Number and percentage of nodes and branches types

式中: N_{CI} 为C-I型分支条数,单位条; N_{CC} 为C-C型分支条数,单位条; N_{II} 为I-I型分支条数,单位条。

通过公式(4),计算得出断层网络分支的平均连接点数 C_B 为1.12。

根据各节点类型和各分支类型的比例以及应用对应的公式计算出来的 C_B ,绘制了节点类型比例和分支类型比例的三角图(图8)。图8a中,当I型节点占主导时, C_B 趋向于0;当X、Y型节点占主导时, C_B 趋向于2。而研究区 C_B 为1.12,值较高,表示连接型节点占较大比例,连通性较好。图8b中,分支的平均连接点数是朝着三角形的C-I和C-C角绘制的网格,

具有高比例的连接型分支,表示了研究区断层网络具有较好的连通性。

5 讨论

为深入揭示深层页岩气储层断层网络的连通性特征,研究断层连通性的影响因素尤为重要。巩磊等^[41]认为:裂缝连通性与裂缝的方位分散度、长度、密度、组间夹角呈现正相关。李飞等^[42]认为断层分形维数具有反映地质体连通性的特性。部分学者论证了裂缝长度分布的分形维数与有效渗透率之间的

关系,有效渗透率随着裂缝长度分布分形维数的增加而增加^[43-45]。LAHIRI^[46]提出了一种新的裂缝网络

有效渗透率估算方法,并由公式推导出,裂缝网络的有效渗透率随着拓扑连通度和分支长度统计分布分

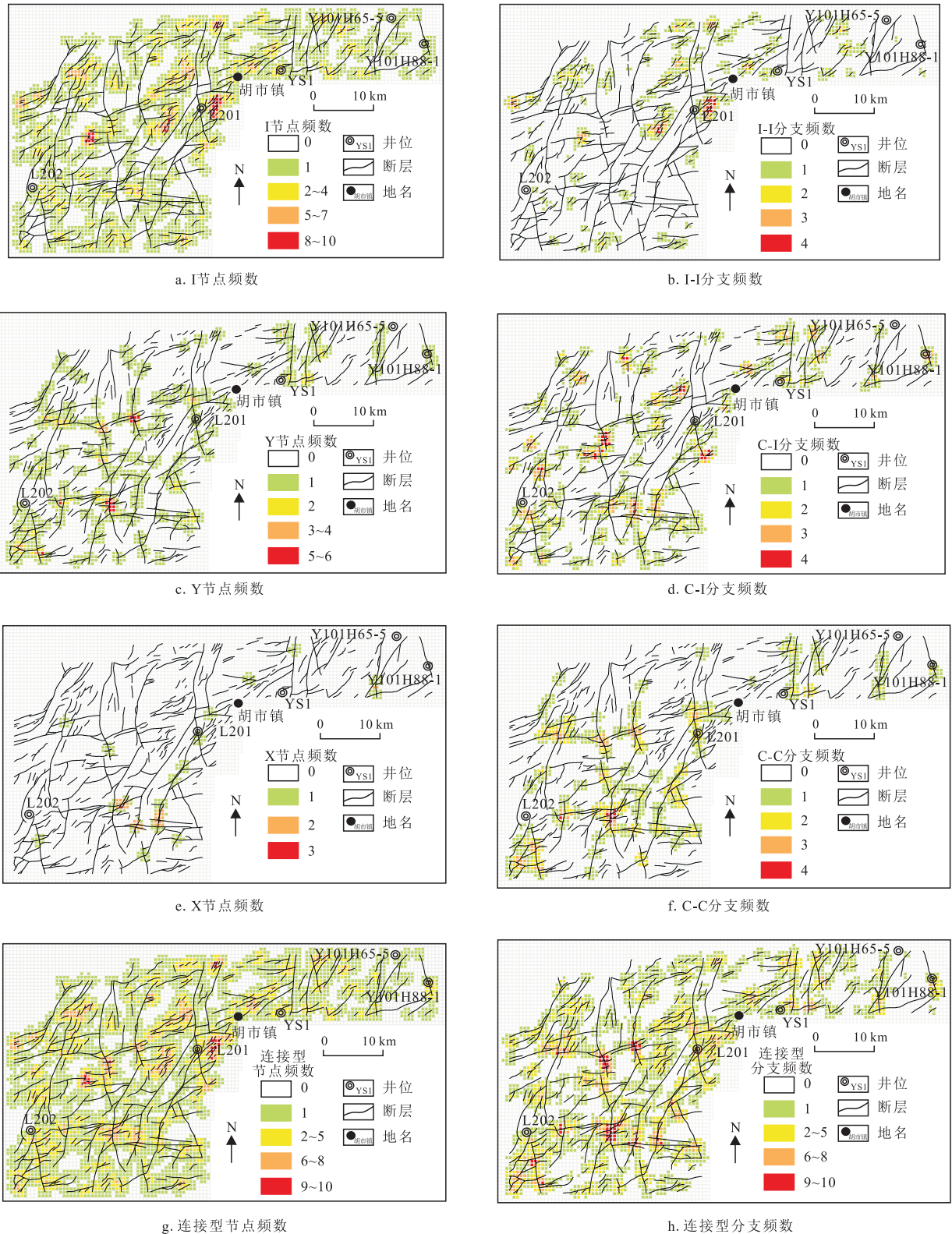


图7 节点和分支频数统计

Fig. 7 Frequency statistics of nodes and branches

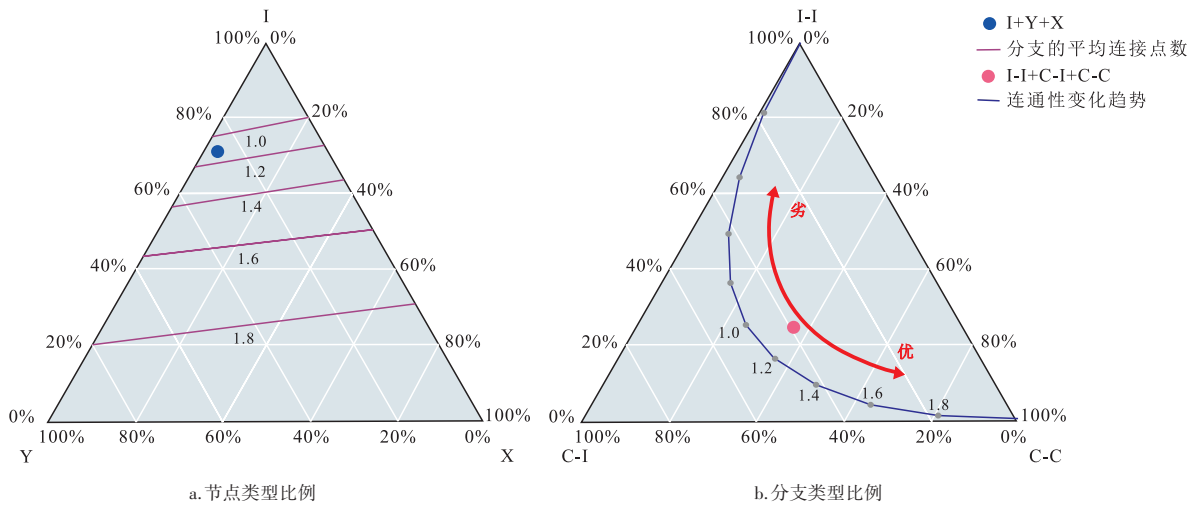


图8 节点类型比例和分支类型比例的三角图
Fig. 8 Ternary diagram of node type ratios and branch type ratios

形维数的增加而非线性增加。谢瑞等^[47]通过流固耦合渗流规律及数值模拟得出不同裂缝连通性指数下累计产油量曲线,随着时间的推移,累计产量随着连通性指数增大而大幅增加。基于前人研究,在页岩气储层中,裂缝的连通性与渗透性、产能具有正相关关系。

根据研究区断层特征,断层走向范围方位分散度较大;断层长度介于0~4.58 km,断层长度的分散度亦较大。上述特征在一定程度上有利于形成连接型节点、分支,从而提高断层连通性。

根据断层特征的线累积频数(图5c),统计出与0~5号采样线相交的断层数量依次为4条、4条、8条、22条、24条、8条。发现与3、4号采样线相交的断层数量较多,即研究区中部及南部断层密度较大,更有利于断层连接型节点、分支形成,其连通性优于其他区域。

GARTRELL等^[48]通过研究断层交汇区的断层位移、应力,发现应力集中和破坏盖层发生垂向渗透的关键部位是断裂交汇处。泸州中区五峰组断层系统纵向形态大致呈“八”字或者接近“Y”型,继续延伸后可能交汇或者接近交汇,形成高渗通道,有利于页岩气运移。断层-裂缝体系,不仅仅能彼此沟通,本身也是重要的储集空间。游离类型的页岩气可以通过连通性较好的断层在裂缝发育部位储集起来。川南泸州中区五峰组断层系统(图4)大部分为没有连通至地表的逆断层,逆断层具有封挡作用,对页岩气可

以有效保存。压力系数是保存条件的重要判别指标,前人研究结果显示其与页岩气产量呈对数正相关关系^[49],研究区五峰组一龙马溪组页岩气层埋藏深,当前压力系数仍然较大。由此,在断层交汇或者接近交汇部位,其节点及分支频数均较高,断层连通性较好。研究区中部、南部存在节点与分支频数高,断层连通性较好的特点,具备潜在高产井形成的断层连通性基础(图7d、7h)。

6 认识与结论

1) 对数字化后的断层数据进行边界定义、抽样规则制定、网格划分、几何与拓扑分析,依据拓扑参数计算断层网络分支的平均连接点数,评价研究区的断层连通性,形成了一种系统化连通性评价方法。

2) 五峰组页岩气储层断层数量多,绝大部分为逆断层,且以二级、三级断层为主;断层走向介于北东向20°~80°,绝大多数介于北东向70°~80°;长度分布介于0~4.58 km,绝大多数介于0.86~1.43 km。断层产状、长度分散度和密度均较大,一定程度上有利于形成复杂断层网络。

3) 利用各节点数和各分支数计算研究区五峰组断层网络分支的平均连接点数 C_B 为1.12,连接型节点(X型、Y型)和连接型分支(C-I型、C-C型)数量占比多,集中在研究区的中部及南部,其连通性比北部好,更有利于页岩气的运移,具备潜在高产井的可能。

参考文献

- [1] 刘鸿渊, 蒲萧亦, 张烈辉, 等. 中国页岩气效益开发: 理论逻辑、实践逻辑与展望[J]. 天然气工业, 2023, 43(4): 177-183.
LIU Hongyuan, PU Xiaoyi, ZHANG Liehui, et al. Beneficial development of shale gas in China: Theoretical logic, practical logic and prospect[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(4): 177-183.
- [2] 张光亚, 马锋, 梁英波, 等. 全球深层油气勘探领域及理论技术进展[J]. 石油学报, 2015, 36(9): 1156-1166.
ZHANG Guangya, MA Feng, LIANG Yingbo, et al. Domain and theory-technology progress of global deep oil & gas exploration [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(9): 1156-1166.
- [3] 何晓, 陈更生, 吴建发, 等. 四川盆地南部地区深层页岩气勘探开发新进展与挑战[J]. 天然气工业, 2022, 42(8): 24-34.
HE Xiao, CHEN Gengsheng, WU Jianfa, et al. Deep shale gas exploration and development in the southern Sichuan Basin: New progress and challenges[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(8): 24-34.
- [4] 李新景, 胡素云, 程克明. 北美裂缝性页岩气勘探开发的启示[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(4): 392-400.
LI Xinjing, HU Suyun, CHENG Keming. Suggestions from the development of fractured shale gas in North America[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(4): 392-400.
- [5] 丁文龙, 许长春, 久凯, 等. 泥页岩裂缝研究进展[J]. 地球科学进展, 2011, 26(2): 135-144.
DING Wenlong, XU Changchun, JIU Kai, et al. The research progress of shale fractures[J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(2): 135-144.
- [6] 聂海宽, 张金川. 页岩气储层类型和特征研究——以四川盆地及其周缘下古生界为例[J]. 石油实验地质, 2011, 33(3): 219-225.
NIE Haikuan, ZHANG Jinchuan. Types and characteristics of shale gas reservoir: A case study of Lower Paleozoic in and around Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(3): 219-225.
- [7] 久凯, 丁文龙, 李玉喜, 等. 黔北地区构造特征与下寒武统页岩气储层裂缝研究[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(4): 797-803.
JIU Kai, DING Wenlong, LI Yuxi, et al. Structural features in northern Guizhou area and reservoir fracture of lower Cambrian shale gas[J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(4): 797-803.
- [8] 王濡岳, 胡宗全, 龙胜祥, 等. 四川盆地上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组页岩储层特征与演化机制[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(2): 353-364.
WANG Ruyue, HU Zongquan, LONG Shengxiang, et al. Reservoir characteristics and evolution mechanisms of the Upper Ordovician Wufeng-Lower Silurian Longmaxi shale, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(2): 353-364.
- [9] 王濡岳, 胡宗全, 周彤, 等. 四川盆地及其周缘五峰组-龙马溪组页岩裂缝发育特征及其控储意义[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(6): 1295-1306.
WANG Ruyue, HU Zongquan, ZHOU Tong, et al. Characteristics of fractures and their significance for reservoirs in Wufeng-Longmaxi shale, Sichuan Basin and its periphery[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(6): 1295-1306.
- [10] JIU K, DING W L, HUANG W H, et al. Fractures of lacustrine shale reservoirs, the Zhanhua Depression in the Bohai Bay Basin, eastern China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2013, 48: 113-123.
- [11] 罗群. 断裂控烃理论的概念、原理、模式与意义[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(3): 316-324.
LUO Qun. Concept, principle, model and significance of the fault controlling hydrocarbon theory[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(3): 316-324.
- [12] 孙建军. 不同类型断-砂配置输导的油气特征及成藏控制作用[J]. 东北石油大学学报, 2013, 37(1): 57-63.
SUN Jianjun. Transporting oil-gas characteristics with different fault-sandstone matching and its control of oil-gas accumulation [J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2013, 37(1): 57-63.
- [13] 柳永军, 赵弟江, 李正宇, 等. 走滑-伸展断裂叠合特征及其控藏作用[J]. 特种油气藏, 2019, 26(2): 45-51.
LIU Yongjun, ZHAO Dijiang, LI Zhengyu, et al. The superposition patterns of strike-slip-extension faults and its effects on hydrocarbon accumulation[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2019, 26(2): 45-51.
- [14] 兰凯, 董成林, 李光泉, 等. 威荣深层页岩气田水平段安全提速技术对策[J]. 断块油气田, 2023, 30(3): 505-510.
LAN Kai, DONG Chenglin, LI Guangquan, et al. Technical strategy to enhance drilling speed safely of horizontal section for deep shale gas field in Weiyuan-Rongchang Block[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2023, 30(3): 505-510.
- [15] 孙东, 杨丽莎, 王宏斌, 等. 塔里木盆地哈拉哈塘地区走滑断裂体系对奥陶系海相碳酸盐岩储层的控制作用[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(增刊1): 80-87.
SUN Dong, YANG Lisha, WANG Hongbin, et al. Strike-slip fault system in Halahatang area of Tarim Basin and its control on reservoirs of Ordovician marine carbonate rock[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(suppl. 1): 80-87.
- [16] 何羽, 任丽, 邓楠. 鄂尔多斯盆地南部 ywb 地区中生界小断层特征及其油气勘探意义[J]. 西北地质, 2020, 53(1): 189-194.
HE Yu, REN Li, DENG Nan. The characteristics of the small faults in Mesozoic Strata of ywb area in the South of Ordos Basin and its significance for oil and gas exploration[J]. Northwestern Geology, 2020, 53(1): 189-194.
- [17] 陈永波, 潘建国, 张寒, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷斜坡区断裂演化特征及对三叠系百口泉组藏意义[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(增刊1): 11-24.
CHEN Yongbo, PAN Jianguo, ZHANG Han, et al. Characteristics of fault evolution in Mahu slope area of Junggar Basin and its implications to the reservoir in the lower Triassic Baikouquan Formation[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(suppl. 1): 11-24.
- [18] 康晏, 邹灵, 刘志勇, 等. 青城凸起中生界内幕断层及油气运聚特征[J]. 油气地质与采收率, 2014, 21(6): 45-48.
KANG Yan, ZOU Ling, LIU Zhiyong, et al. Faulted structure and its effect on oil-gas reservoir forming in Qingcheng arch[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(6): 45-48.
- [19] 杨同振. 东营凹陷北带深层油气输导体系特征及控藏作用[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2014.
YANG Tongzhen. Characteristics of hydrocarbon carrier and role in deep reservoir-formation in the north zone of Dongying

- Sag[D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2014.
- [20] 李玮, 孙文峰, 唐鹏, 等. 基于拓扑结构的岩石裂缝网络表征方法[J]. 天然气工业, 2017, 37(6): 22-27.
LI Wei, SUN Wenfeng, TANG Peng, et al. A method for rock fracture network characterization based on topological structure [J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(6): 22-27.
- [21] KIM I, PARK S I, KWON S, et al. Evolution of fracture networks and connectivity during fault-bend folding: Insights from the Sinon Anticline in the southwestern Hongseong-Imjingang Belt, Korea[J]. Journal of Structural Geology, 2021: 5-17.
- [22] 赵欢. 裂缝性致密砂岩储层连通性及压裂机理研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2020.
ZHAO Huan. Study on the connectivity and the fracture initiation mechanism of fractured tight sandstone reservoir[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2020.
- [23] 王迪, 吴智平, 宋国奇, 等. 断裂网络体系拓扑结构与油气运移的关系——以临南洼陷为例[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(1): 154-162.
WANG Di, WU Zhiping, SONG Guoqi, et al. Topological structure of fault network system and its relationship with hydrocarbon migration: Taking Linnan Sag as an example[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(1): 154-162.
- [24] 王希贤. EBANO油田Ksf和Kan层裂缝特征及连通性分析[J]. 油气地质与采收率, 2021, 28(2): 135-142.
WANG Xixian. Fracture characteristics and connectivity analysis of Ksf and Kan formations in EBANO oilfield[J]. Petroleum Geology And Recovery Efficiency, 2021, 28(2): 135-142.
- [25] 南佳琛, 戴鸿鸣. 气相色谱指纹技术在哈拉哈塘油田跃满区块跃满2缝洞系统中油藏连通性的应用[J]. 化工管理, 2019, 26(29): 219-220.
NAN Jiachen, DAI Hongming. Application of gas chromatography fingerprint technology in the connectivity of Yueman 2 fracture-cave system in Yueman Block, Halahatang Oilfield[J]. Chemical Engineering Management, 2019, 26(29): 219-220.
- [26] GHOSH K, MITRA S. Structural controls of fracture orientations, intensity, and connectivity, Teton anticline, Sawtooth Range, Montana[J]. AAPG Bulletin, 2011, 93(8): 995-1014.
- [27] RUBINO J G, GUARRACINO L, MUELLER T M. Do seismic waves sense fracture connectivity? [J]. Geophysical Research Letters, 2013, 40(4): 692-696.
- [28] 闫建平, 罗静超, 石学文, 等. 川南泸州地区奥陶系五峰组—志留系龙马溪组页岩裂缝发育模式及意义[J]. 岩性油气藏, 2022, 34(6): 60-71.
YAN Jianping, LUO Jingchao, SHI Xuewen, et al. Fracture development models and significance of Ordovician Wufeng-Silurian Longmaxi shale in Luzhou area, southern Sichuan Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2022, 34(6): 60-71.
- [29] 彭井宏, 周军, 胡承强, 等. 热力耦合作用下地下盐岩储气库注采运行稳定性研究[J]. 断块油气田, 2023, 30(5): 858-867.
PENG Jinghong, ZHOU Jun, HU Chengqiang, et al. Study on the injection-production stability of underground salt rock gas storage under thermo-mechanical coupling[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2023, 30(5): 858-867.
- [30] 董敏, 郭伟, 张林炎, 等. 川南泸州地区五峰组—龙马溪组古构造应力场及裂缝特征[J]. 岩性油气藏, 2022, 34(1): 43-51.
DONG Min, GUO Wei, ZHANG Linyan, et al. Characteristics of paleotectonic stress field and fractures of Wufeng-Longmaxi Formation in Luzhou area, southern Sichuan Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2022, 34(1): 43-51.
- [31] 张成林, 赵圣贤, 张鉴, 等. 川南地区深层页岩气富集条件差异分析与启示[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(2): 248-261.
ZHANG Chenglin, ZHAO Shengxian, ZHANG Jian, et al. Analysis and enlightenment of the difference of enrichment conditions for deep shale gas in southern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(2): 248-261.
- [32] 张坦. 川南地区断裂特征与构造样式分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
ZHANG Tan. Fracture characteristics and construal styles in southern Sichuan area[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2020.
- [33] 李楠, 洪海涛, 李国辉, 等. 四川盆地高陡构造区凉高山组页岩油气地质特征[J]. 天然气勘探与开发, 2022, 45(4): 86-95.
LI Nan, HONG Haitao, LI Guohui, et al. Geological characteristics of shale oil and gas in Liangshan Formation, high and steep structure area, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2022, 45(4): 86-95.
- [34] SANDERSON D J, NIXON C W. The use of topology in fracture network characterization[J]. Journal of Structural Geology, 2015, 72: 55-66.
- [35] 李玮, 赵欢, 李思琪, 等. 页岩裂缝网络的几何特征二维表征及连通性分析[J]. 石油钻探技术, 2017, 45(6): 70-76.
LI Wei, ZHAO Huan, LI Siqi, et al. 2D characterization of geometric features and connectivity of fracture networks in shale formations[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017, 45(6): 70-76.
- [36] ANDRESEN C A, EHANSEN A, GOC R E, et al. Topology of Fracture Networks[J]. Frontiers in Physics, 2013, 1(7): 1-5.
- [37] MANZOCCHI T. The connectivity of two-dimensional networks of spatially correlated fractures[J]. Water Resources Research, 2002, 38: 109-113.
- [38] ERZSÉBET R, LÁSZLÓ B A. Hierarchical organization in complex networks[J]. Physical Review E, 2003, 67: 1-7.
- [39] DUFFY O B, NIXON C W, BELL R E, et al. The topology of evolving rift fault networks: Single-phase vs multi-phase rifts [J]. Journal of Structural Geology, 2017, 96: 192-202.
- [40] SANDERSON D J, DAVID C P, NIXON C W, et al. Graph theory and the analysis of fracture networks[J]. Journal of Structural Geology, 2018: 156-164.
- [41] 巩磊, 程宇琪, 高帅, 等. 库车东部下侏罗统致密砂岩储层裂缝连通性表征及其主控因素[J]. 地球科学, 2023, 48(7): 2475-2488.
GONG Lei, CHENG Yuqi, GAO Shuai, et al. Fracture connectivity characterization and its controlling factors in Lower Jurassic tight sandstone reservoirs of eastern Kuqa Foreland Basin[J]. Earth Science, 2023, 48(7): 2475-2488.
- [42] 李飞, 刘国生, 周庆卫, 等. 分形理论在断裂与矿产关系研究

- 中的应用[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2016, 39(5): 701-706.
- LI Fei, LIU Guosheng, ZHOU Qingwei, et al. Application of fractal theory to study the relationship between fracture and mineral resources[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science Edition), 2016, 39(5): 701-706.
- [43] JAFARI A, BABADAGLI T. Estimation of equivalent fracture network permeability using fractal and statistical network properties[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2012, 92: 110-123.
- [44] MIAO T J, YU B M, DUAN Y G, et al. A fractal analysis of permeability for fractured rocks[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 81: 75-80.
- [45] ZHU J T, CHENG Y Y. Effective permeability of fractal fracture rocks: Significance of turbulent flow and fractal scaling [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 116: 549-556.
- [46] LAHIRI S. Estimating effective permeability using connectivity and branch length distribution of fracture network[J]. Journal of Structural Geology, 2021, 146: 5-14.
- [47] 谢瑞, 张尚锋, 周林, 等. 川东地区侏罗系自流井组大安寨段致密储层油气成藏特征[J]. 岩性油气藏, 2023, 35(1): 108-119.
- XIE Rui, ZHANG Shangfeng, ZHOU Lin, et al. Hydrocarbon accumulation characteristics of tight reservoirs of Da'anzhai member of Jurassic Ziliujing Formation in eastern Sichuan Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2023, 35(1): 108-119.
- [48] GARTRELL A, ZHANG Y H, LISK M, et al. Fault intersections as critical hydrocarbon leakage zones: Integrated field study and numerical modelling of an example from the Timor Sea, Australia[J]. Marine & Petroleum Geology, 2004, 21(9): 1165-1179.
- [49] 董大忠, 梁峰, 管全中, 等. 四川盆地五峰组—龙马溪组页岩气优质储层发育模式及识别评价技术[J]. 天然气工业, 2022, 42(8): 96-111.
- DONG Dazhong, LIANG Feng, GUAN Quanzhong, et al. Development model and identification evaluation technology of Wufeng-Longmaxi Formation quality shale gas reservoirs in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(8): 96-111.
- (编辑 余聪)

(上接第 445 页)

- [16] LIU B, SHI J X, FU X F, et al. Petrological characteristics and shale oil enrichment of lacustrine fine-grained sedimentary system: A case study of organic-rich shale in first member of Cretaceous Qingshankou Formation in Gulong Sag, Songliao Basin, NE China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(5): 884-894.
- [17] 唐凡, 朱永刚, 张彦明, 等. CO₂注入对储层多孔介质及赋存流体性质影响实验研究[J]. 石油与天然气化工, 2021, 50(1): 72-76.
- TANG Fan, ZHU Yonggang, ZHANG Yanming, et al. Experimental research of the effect of CO₂ injection on porous media and fluid property in reservoir[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2021, 50(1): 72-76.
- [18] 滕建彬. 东营凹陷页岩油储层中方解石的成因及证据[J]. 油气地质与采收率, 2020, 27(2): 18-25.
- TENG Jianbin. Origin and evidence of calcite in shale oil reservoir of Dongying Sag[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2020, 27(2): 18-25.
- [19] 陈恋, 袁梅, 向维, 等. PCA-Fisher判别模型在煤层底板突水预测中的应用[J]. 数学的实践与认识, 2021, 51(6): 103-111.
- CHEN Lian, YUAN Mei, XIANG Wei, et al. Application of PCA-Fisher discriminant model in prediction of water inrush from coal seam floor[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2021, 51(6): 103-111.
- [20] 陈红江, 李夕兵, 刘爱华, 等. 用 Fisher 判别法确定矿井突水水源[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2009, 40(4): 1114-1120.
- CHEN Hongjiang, LI Xibing, LIU Aihua, et al. Identifying of mine water inrush source by Fisher discriminant analysis method[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2009, 40(4): 1114-1120.
- [21] 张海桥. 海拉尔盆地红旗凹陷烃源岩评价及有利区预测[J]. 大庆石油地质与开发, 2020, 39(2): 21-27.
- ZHANG Haiqiao. Evaluation of the hydrocarbon source rock and prediction of the favorable zone in Hongqi Sag of Hailar Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2020, 39(2): 21-27.
- [22] 王健, 石万忠, 舒志国, 等. 富有机质页岩 TOC 含量的地球物理定量预测[J]. 石油地球物理勘探, 2016, 51(3): 596-604.
- WANG Jian, SHI Wanzhong, SHU Zhiguo, et al. TOC content quantitative prediction in organic-rich shale[J]. Petroleum Geophysical Exploration, 2016, 51(3): 596-604.
- [23] PASSEY Q R, CREANEY S, KULLA J B, et al. Practical model for organic richness from porosity and resistivity logs[J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(12): 1777-1794.
- [24] SCHMOKER J W. Determination of organic content of Appalachian Devonian shales from formation-density logs[J]. AAPG Bulletin, 1979, 63(9): 1504-1537.
- [25] 陈钢花, 梁莎莎, 王军, 等. 卷积神经网络在岩性识别中的应用[J]. 测井技术, 2019, 43(2): 130-135.
- CHEN Ganghua, LIANG Shasha, WANG Jun, et al. Application of convolutional neural network in lithology identification[J]. Well Logging Technology, 2019, 43(2): 130-135.
- [26] 刘巍, 刘威, 谷建伟, 等. 利用卡尔曼滤波和人工神经网络相结合的油藏井间连通性研究[J]. 油气地质与采收率, 2020, 27(2): 118-124.
- LIU Wei, LIU Wei, GU Jianwei, et al. Research on interwell connectivity of oil reservoirs based on Kalman filter and artificial neural network[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2020, 27(2): 118-124.
- (编辑 郭群)