

重庆下古生界页岩顺层滑脱变形域的形成及其地质意义

岳 锋^{1,2}, 李永臣³, 赵宝山³, 曾祥亮²

(1. 甘肃省交通规划勘察设计院股份有限公司, 甘肃 兰州 730030; 2. 重庆地质矿产研究院, 重庆 400042;

3. 中国石油 煤层气有限责任公司, 北京 100028)

摘要:在野外露头 and 岩心观察基础上,通过力学分析,对重庆下古生界页岩中顺层滑脱变形域的类型、特征及其形成进行了研究,并结合页岩气勘探实践,对其地质意义进行了探讨。顺层滑脱变形域包括挤压型和重力型两类。挤压型顺层滑脱变形域形成时水平挤压构造应力占主导地位,岩层发生“逆断层”运动;重力型顺层滑脱变形域形成时上覆地层压力占主导地位,岩层发生“正断层”运动。挤压型顺层滑脱变形域地层变形相对较强,影响范围相对较大。埋藏深度和岩层倾角是控制同一地区同一页岩层中顺层滑脱变形域形成的关键地质要素。页岩埋深越大,形成挤压型顺层滑脱变形域时的临界岩层倾角越大,而形成重力型顺层滑脱变形域的临界岩层倾角则越小。重力型顺层滑脱变形域破坏页岩气保存条件。背斜构造部位挤压型顺层滑脱变形域所形成的顺层破碎带和网状裂缝系统是页岩气重要的运移通道和储集空间,向斜构造部位挤压型顺层滑脱变形域所形成的顺层破碎带和网状裂缝系统成为页岩气向临近背斜构造部位运移或向地表散失的重要通道。

关键词:顺层滑脱变形域;形成机理;地质意义;下古生界;页岩;重庆

中图分类号:P542.3

文献标识码:A

Bedding decollement deformation domain in the Lower Paleozoic shales in Chongqing: Formation and geological significance

Yue Feng^{1,2}, Li Yongchen³, Zhao Baoshan³, Zeng Xiangliang²

(1. Gansu Province Transportation Planning, Survey & Design Institute Co., Ltd., Lanzhou, Gansu 730030, China;

2. Chongqing Institute of Geology and Mineral Resources, Chongqing 400042, China;

3. PetroChina Coalbed Methane Co., Ltd., Beijing 100028, China)

Abstract: The study presents the types, characteristics and the forming process of the bedding decollement deformation domain in the Lower Paleozoic shales in southeast Chongqing via mechanical analysis based on the observation of shale outcrops and cores, and discusses its geological significances in combination with shale gas exploration practices. Two types of bedding decollement deformation domains, namely compression-type and gravity-type, are recognized. The compression-type is formed when horizontal compressive tectonic stress dominates and shale layers are under the action of reverse fault; on the contrary, the gravity-type is formed when the overburden pressure dominates and the shale layers are under the action of normal fault. Compared with the gravity-type, the compression-type is more intense in stratum deformation with larger scale of influence on shales. Burial depth and dip angles are the key geological factors that control the formation of bedding decollement deformation domain in the same shale layer in a certain area. The critical dip angles for the compression-type expand gradually with the shale burial depth increasing, whereas that for the gravity-type decreases gradually with the increasing burial depth. The gravity-type is destructive to the preservation of shale gas. The bedding crushed zones and net fracture systems resulted by compression-type in an anticline are interpreted as the main migration pathways and reservoir space for shale gas, while those in a syncline are the main pathways for shale gas

收稿日期:2017-02-06; 修订日期:2018-03-12。

第一作者简介:岳锋(1986—),男,工程师,构造地质学。E-mail: lenyue860612@163.com。

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2012CB214705-05);重庆市社会事业与民生保障科技创新专项(cstc2017shmsA90003);重庆市国土房管局科技计划项目(KJ-2015014)。

migrating to adjacent anticlines or releasing in the atmosphere.

Key words: bedding decollement deformation domain, formation mechanism, geological significance, Lower Paleozoic, shale, Chongqing

中石化涪陵页岩气田的发现及其商业开发,标志着我国页岩气勘探开发实现重大突破^[1]。综观南方海相页岩气勘探现状,我国页岩气勘探开发受到复杂地质条件的严重制约。特别是构造作用对页岩气保存及富集的影响,成为制约页岩气勘探开发实现面上突破的主要原因^[1-5]。

前人研究结果表明,构造作用对页岩气保存和富集的影响主要体现在以下四方面:①构造作用产生的断裂会造成页岩气的散失,破坏页岩气的保存;②构造作用所形成的裂缝系统是页岩气重要储集空间和主要渗流通道,页岩裂缝既可成为页岩气储集空间,又可成为页岩气散失通道,对页岩气的富集、保存及开发产生重要影响;③构造作用所形成的不整合面是页岩气散失的重要通道,破坏页岩气保存条件;④构造作用所形成的糜棱化劈理域是页岩气重要储集空间,影响页岩气的赋存和富集^[6-21]。

以上四种构造类型是常见的影响页岩气保存和富集的构造类型。实际上,还有一种由强烈构造作用或重力作用形成的沿页理面或层理面发生顺层滑动并在滑动面上形成构造变形带的构造类型,本文称之为“顺层滑脱变形域”。顺层滑脱变形域具有一条延伸较长的顺层破碎带,破碎带内发育有网状裂缝系统,是页岩气重要储集空间和主要侧向运移通道,对页岩气富集和保存具有十分重要的意义。前人研究成果主要侧重于对滑脱裂缝的分析^[6,22-26],顺层滑脱变形域易被忽视,原因在于:岩心尺度上顺层滑脱裂缝多见,但顺层滑脱所形成的构造变形带无法在岩心上显示其整体面貌,顺层滑脱面之上的破碎带可能被误认成小型断层破碎带。为探讨顺层滑脱变形域的形成机理及其对页岩气富集和保存的影响,基于页岩露头、钻井岩心观察,分析顺层滑脱变形域的类型及其形成机制;通过受力条件分析,探讨顺层滑脱变形域形成地质条件及主要影响因素;最后,根据钻井资料分析,探讨顺层滑脱变形域对页岩气富集和保存的影响。研究成果从岩性层角度对分层流变研究提供了重要证据,对我国南方强构造改造区页岩气勘探选区具有重要指导意义。

1 区域地质背景

研究区位于盆缘地质条件较复杂的渝东南和渝东

北地区,文中页岩野外露头 and 钻井皆位于以上地区。

渝东南地区位于七曜山基底断裂南东部,大地构造上属于扬子准地台上扬子台内坳陷构造单元。渝东南地区构造运动复杂,主要经历了印支运动、燕山运动和喜马拉雅运动,形成了以北北东向构造为主的现今构造面貌,产生了大量北北东向褶皱、断裂和裂缝系统(图1)。地层变形强度显示出由南东向北西逐渐减弱的规律,南东部表现为背斜宽缓、向斜紧闭的隔槽式褶皱,靠近七曜山断裂一侧的北西部表现为背斜紧闭、向斜宽缓的隔挡式褶皱,中部表现为过渡式褶皱。渝东南地区是我国重要的页岩气成藏有利区之一,主要发育下志留统龙马溪组和下寒武统牛蹄塘组两套富有机质页岩。

渝东北地区位于上扬子地块北缘,属大巴山冲断带,为四川盆地与秦岭造山带的过渡部位,整体为一向南西凸出的弧形构造带。以城口断裂为界可将渝东北地区划分为南大巴山前陆冲断褶皱带和北大巴山逆冲推覆构造带两个地层-构造单元。渝东北地区构造运动同样较为复杂,主要形成近EW向密集、大体平行、不对称的背斜和向斜构造。巫溪一带构造线呈近EW向,至城口构造线逐渐向N偏转,呈NW向延展,由SW向NE褶皱的强度和密度都显示出由强变弱、由密到疏的特点(图2)。渝东北地区主要发育下寒武统鲁家坪组(水井沱组)和下志留统龙马溪组两套富有机质页岩。

2 顺层滑脱变形域类型及其形成机制

页岩层具有强烈非均质性,沿页理方向抗剪强度较低,在伸展或挤压构造应力作用下,易于在页岩与强硬岩层交界处沿页理面或层理面发生顺层滑动^[22-23]。顺层滑动破裂面上部常形成一条破碎带,破碎带内发育有与层理面平行或小角度相交的剪切裂缝(低角度滑脱裂缝),破碎带之上常发育有调节层内地层变形的小型褶皱构造或断裂。这些由顺层滑脱作用形成的包含顺层滑脱破碎带、滑脱裂缝及变形调节褶皱等构造要素在内的构造变形区域称为顺层滑脱变形域。

根据顺层滑脱变形域形成地质背景及力学条件、顺层滑脱变形域地质特征,将顺层滑脱变形域分为两种类型,即挤压型和重力型。两种不同类型顺层滑脱变形域具有不同的形成机制及地质特征(表1)。

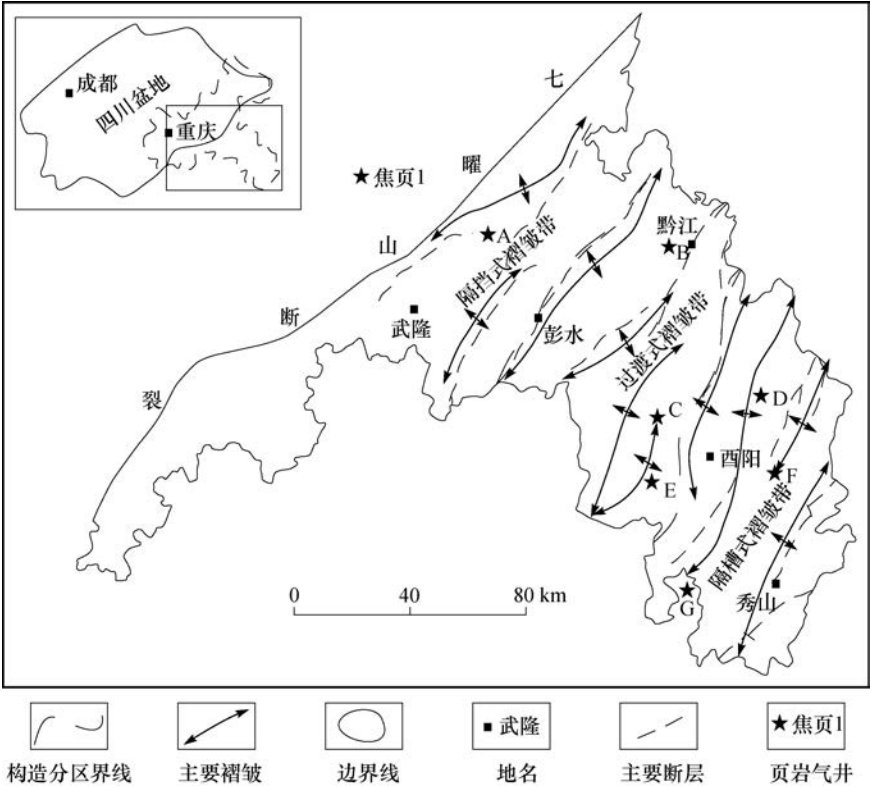


图 1 渝东南地区地质概况

Fig. 1 Geology of southeast Chongqing

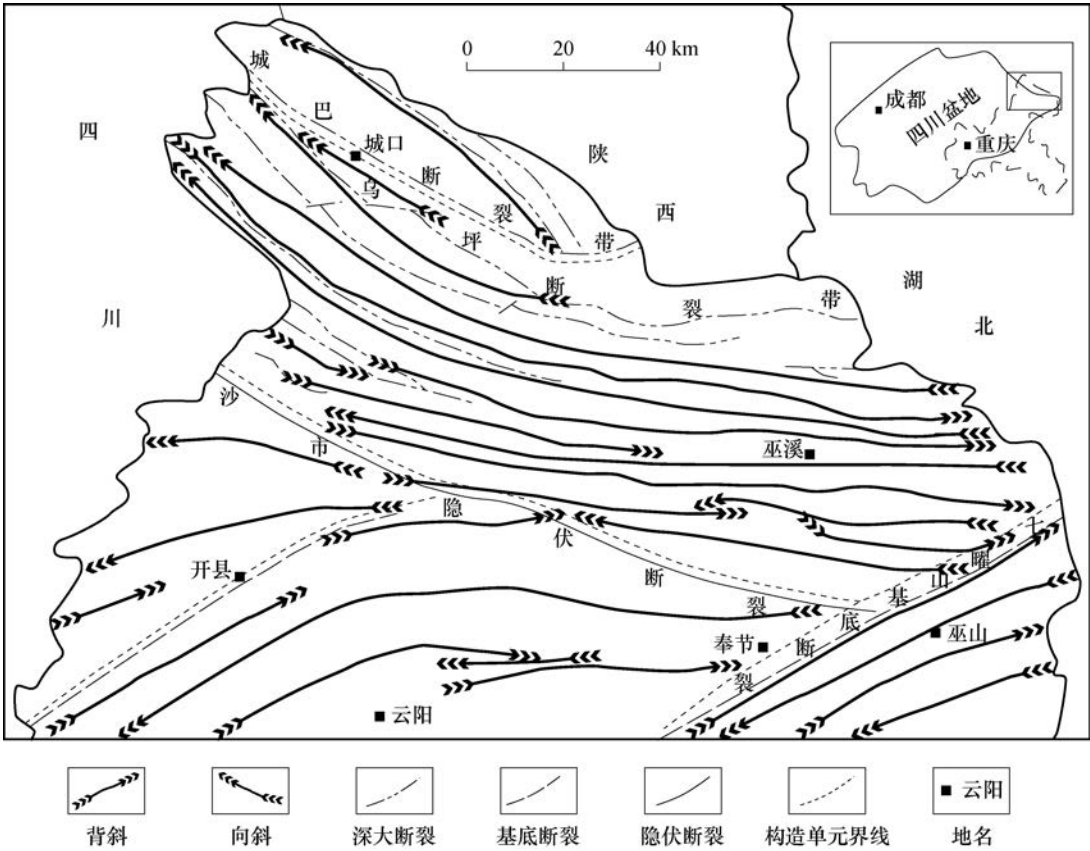


图 2 渝东北地区地质概况

Fig. 2 Geology of northeast Chongqing

表1 两种类型顺层滑脱变形域对比

Table 1 Comparison of two kinds of bedding decollement deformation domain

类型	地层产状	形成时间	滑脱裂缝	调节褶皱	力学条件	破碎带宽度/m	滑脱面上下岩石强度差异	典型实例
挤压型	平缓、倾斜、高陡	早	发育	发育	$G' < \sigma'$	<0.1	相对较大	渝东南
重力型	高陡	晚	发育	不发育	$G' > \sigma'$	0.5 ~ 3.5	相对较小	渝东北

注: G' 为沿页理面或层理面方向的重力分量, σ' 为沿页理面或层理面方向的水平应力分量。

2.1 挤压型

挤压型顺层滑脱变形域是在水平挤压构造应力占主导地位的应力环境下形成的,挤压型顺层滑脱变形域所在岩层倾角变化范围较大,平缓、倾斜或高陡地层中皆可发育,渝东南盆缘山区下古生界页岩中发育的顺层滑脱变形域即为典型的挤压型顺层滑脱变形域。在地层平缓或倾斜状态下,形成挤压型顺层滑脱变形域时,顺页岩页理面方向水平剪切应力分量通常情况下要远大于上覆地层重力分量。在高陡地层中,挤压型顺层滑脱变形域实际上在地层尚处于平缓或倾斜状态下已形成,后经后期持续、强烈构造挤压作用呈现出一种高陡产出状态。因此,平缓、倾斜或高陡地层中挤压型顺层滑脱变形域的形成机制实际上是基本一致的。

以渝东南黔江地区下古生界龙马溪组页岩露头为例,挤压型顺层滑动构造变形域在露头上表现为沿龙马溪组页岩底部层段顺层滑动所形成的一条破碎带及破碎带上部调节层内形变的褶皱构造。顺层滑动沿龙马溪组页岩与下伏临湘组强硬灰岩层接触界面发生,滑动破碎带内位于龙马溪页岩的底部,破碎带内主要发育与层理面平行或小角度相交的剪切裂缝,与目的层内以高角度剪切裂缝为主的裂缝体系明显不同(图3)。岩心上滑动破碎带宽约0.5~3.5 m,破碎带内岩心不连续,常见方解石等充填矿物,充填矿物多杂乱分布。破碎带内顺层滑脱裂缝及低角度滑脱裂缝发育,这两种滑脱裂缝是页岩在顺层剪切应力作用下沿页理面发生剪切滑动形成的,滑脱裂缝面上有明显的擦痕、阶步及镜面特征,部分被方解石等矿物充填(图4)。

2.2 重力型

重力型顺层滑脱变形域的形成机制与挤压型顺层滑脱变形域的形成机制具有较大的差异。重力型顺层滑脱变形域的形成经历两个构造应力变化阶段:第一阶段,在强烈挤压构造应力作用下,早期平缓地层被挤压至倾斜状态,直至呈高陡状产出;第二阶段,随着挤压构造应力的逐渐减弱或构造应力逐渐转向伸展构造

应力状态,上覆地层压力逐渐占主导地位,当沿页理面方向应力分量大于页理面抗剪强度,页岩沿页理面发生顺层滑动,并沿顺层滑脱面形成断裂、裂缝等相关构造,这些构造同顺层滑脱面一起构成重力型顺层滑脱变形域。因此,重力型顺层滑脱变形域通常是在上覆地层压力(主要是岩层重力)占主导作用的应力环境下形成的。渝东北盆缘山区下古生界页岩地层中高角度产出的顺层滑脱变形域多为重力型顺层滑脱变形域。

在重力型顺层滑脱变形域形成过程中,起主导作用的上覆地层压力随着埋深的增加而逐渐加大。与挤压型顺层滑脱变形域相比,重力型顺层滑脱变形域地层变形强度相对较弱,顺层滑脱构造变形影响范围相对较小。以渝东北城口地区下古生界水井沱组页岩露头为例,重力型顺层滑脱变形域在露头上表现为一条沿层理面或页理面发育的滑动破裂带,单个破裂带两侧地层间距明显,但宽度相对较小。岩心上多表现为具有一定间隔距离的顺层滑动集中发育的窄条带,破裂带宽度一般小于0.5 m。破裂带内还发育有与层理面或页理面低角度相交的滑脱裂缝及顺层滑脱裂缝形成时由派生张应力形成的与层理面或页理面高角度相交的张裂缝。滑脱裂缝面上有明显的擦痕、阶步及镜面特征,部分被石英、方解石等矿物充填(图5a—c)。



图3 渝东南黔江地区野外页岩露头上顺层滑脱变形域

Fig. 3 Bedding decollement deformation domain in shale outcrop in Qianjiang, southeast Chongqing



图 4 渝东南页岩气钻井岩心上顺层滑脱变形域特征

Fig. 4 Characteristics of bedding decollement deformation domain on cores of shale in southeast Chongqing

a. 西浅 1 井,埋深 1 096.3 m;b. 西地 2 井,埋深 833.5 m;c. 渝参 6 井,埋深 703.2 m;d. 渝参 7 井,埋深 800.1 m;e. 渝参 8 井,埋深 904.5 m;
f. 渝参 9 井,埋深 1 459.7 m

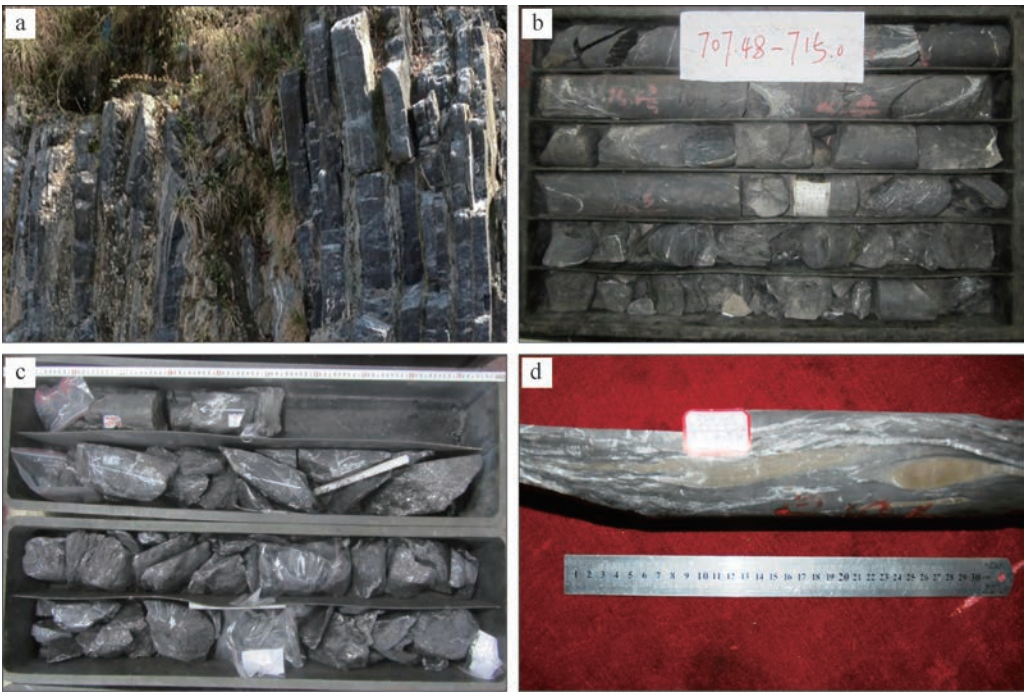


图 5 渝东北野外露头及岩心上顺层滑脱变形域特征

Fig. 5 Characteristics of bedding decollement deformation domain on outcrops and cores in northeast Chongqing

a. 城口野外露头;b. 城浅 1 井,埋深 709.7 m,岩心;c. 渝参 2 井,埋深 293.1 m,岩心;d. 渝参 2 井,埋深 407.6 m,岩心

对比来看,重力型顺层滑脱变形域常沿岩石能干性相对较强的岩层之间的层理面或页理面形成。可能原因在于:早期强烈挤压作用下,能干性相对较弱的岩层会优先沿层理面或页理面发生顺层滑动,顺层滑动

构造会吸收、减弱水平构造挤压应力的能量,能干性相对较强的岩石会慢慢被推挤成高陡状。当后期水平构造应力逐渐减小且上覆地层压力达到一定程度时,能干性较强的岩层会沿层理面或页理面发生顺层滑动从

而形成重力型顺层滑脱变形域。

上述重力型顺层滑脱变形域为泥质岩成岩后所形成的构造类型。实际上,泥质岩成岩前含有较多的水分,未固结,粘结力较差,倾斜地层条件下由于重力作用易失稳,并沿层理面方向发生层间滑动,这种层间滑动在泥质岩间较为普遍。泥质岩在沉积过程中,靠陆一侧沉积厚度相对较小,在垂向重力作用下,沿页理方向表现为拉张应力状态,形成一系列高角度正断层等构造变形,该类型正断层表现为上陡下缓的展布特征,断层下端产状逐渐变缓直至平行于层理方向,开始发生顺层剪切,并形成层间滑动构造;靠海一侧泥质岩沉积厚度相对较大,在靠陆一侧泥质岩侧向推挤和自身重力作用下,泥质岩沿层理方向表现为挤压应力状态,并在一定条件下沿层理面方向产生层间滑动,形成一系列向海倾伏的褶皱系统。同时层内形成一系列高角度逆断层,逆断层下陡上缓,断层面自上逐渐与层面平行,发生顺层剪切,并形成顺层滑脱构造^[27-29]。成岩前重力型顺层滑脱构造由于形成时间相对较早,顺层滑脱面易被石英、方解石等矿物多期次充填,常被后期由构造运动形成的一系列高角度天然裂缝切割(图5d)。

顺层滑脱变形域类型主要依据顺层滑脱面上下岩层的相对运动方向、顺层滑脱变形域的发育特征和规模进行区分。根据上述分析,挤压型顺层滑脱变形域形成时岩层发生“逆断层”运动,即顺层滑动破碎带上部岩层向上运动;重力型顺层滑脱变形域形成时岩层发生“正断层”运动,即顺层滑动破碎带上部岩层向下运动。顺层滑脱变形域岩层相对运动方向可根据滑脱面擦痕和阶步方向、顺层滑脱破碎带对裂缝的切割情况及低角度滑脱裂缝的分布情况等判断。

3 顺层滑脱变形域形成地质条件

顺层滑脱变形域本质上是沿页理面或层理面发生剪切破裂的变形构造带。剪破裂的形成通常用库仑-莫尔剪破裂准则来判断,该破裂理论认为,岩石的剪切破坏主要是在某个面上的剪切破裂,面上的剪切破坏与面上的正应力 σ 与剪应力 τ 的组合有关。即剪破裂的发生不仅和破裂面上的剪应力有关,还决定于破裂面上的正应力。库仑-莫尔准则用公式表示为

$$[\tau] = C + \sigma \tan \varphi \quad (1)$$

式中: C 为粘聚力,kPa; φ 为内摩擦角,(°)。当某一方面上剪应力 $[\tau]$ 与正应力 σ 满足上式时,则开始出现剪切破裂, $[\tau]$ 即为极限剪应力,N/m²。

基于库仑-莫尔剪破裂准则,根据顺层滑脱变形

域形成的力学条件分析,对两类顺层滑脱变形域形成的地质条件进行探讨。

3.1 挤压型

挤压型顺层滑脱变形域形成时,顺页理面或层理面方向剪切应力大于页理面或层理面的抗剪强度,即

$$F \cos a - \rho g h \sin a \geq (\rho g h \cos a + F \sin a) \tan \varphi + C \quad (2)$$

式中: F 为水平主应力大小,N; a 为岩层倾角,(°); ρ 为上覆岩层平均密度,g/m³; g 为重力加速度,N/kg; h 为页岩埋深,m; φ 为页理面或层理面内摩擦角,(°); C 为页理面或层理面粘聚力,kPa。上式可以变换为

$$a \geq \sin^{-1} \frac{F - \rho g h \tan \varphi}{\sqrt{(1 + \tan^2 \varphi)(F^2 + \rho^2 g^2 h^2)}} - \sin^{-1} \frac{C}{\sqrt{(1 + \tan^2 \varphi)(F^2 + \rho^2 g^2 h^2)}} \quad (3)$$

页岩页理面或层理面粘聚力和内摩擦角较小,同一地区同一层段页岩两参数变化不大,且同一地区所受到的古构造应力基本一致。由公式(3)可以看出,页岩埋藏深度和岩层倾角是控制同一地区同一页岩层中挤压型顺层滑脱变形域形成的关键地质要素,挤压型顺层滑脱变形域的形成需满足上述关系。对渝东南地区两套富有机质页岩,埋深越大,岩层倾角越大,越有利于挤压型顺层滑脱变形域的形成。

3.2 重力型

重力型顺层滑脱变形域形成时,顺页理面或层理面方向应力分量同样大于页理面或层理面的抗剪强度,即:

$$\rho g h \sin a - F \cos a \geq (\rho g h \cos a + F \sin a) \tan \varphi + C \quad (4)$$

公式4可变换为:

$$a \geq \sin^{-1} \frac{F + \rho g h \tan \varphi}{\sqrt{(1 + \tan^2 \varphi)(F^2 + \rho^2 g^2 h^2)}} + \sin^{-1} \frac{C}{\sqrt{(1 + \tan^2 \varphi)(F^2 + \rho^2 g^2 h^2)}} \quad (5)$$

公式(5)表明,页岩埋藏深度和岩层倾角同样是控制同一地区同一页岩层中重力型顺层滑脱变形域形成的关键地质要素,重力型顺层滑脱变形域的形成需满足上述关系。对某一时间的同一页岩层,页岩粘聚力、内摩擦角、古构造应力场大小等参数基本一致,页岩发生重力型顺层滑脱的临界岩层倾角随页岩埋深增大而逐渐减小。

以渝东北实际地质情况为例,页岩页理面粘聚力一般在0.1 MPa,内摩擦角约10°;稳定构造时期古

构造应力相对较小,取值 10 MPa;根据渝东北地区钻井情况,上覆岩层密度均值取为 2.62 g/cm³,g 为常数。计算发现,在地表条件下,页岩发生重力型顺层滑脱的临界岩层倾角在 80℃以上;在地下埋藏条件下,页岩发生重力型顺层滑脱的临界岩层倾角随深度增加逐渐减小,并无限趋近于 10℃。

4 顺层滑脱变形域对页岩气保存和富集的影响

顺层滑脱变形域本质上是沿页理或层理发生顺层滑动而形成的一个变形破碎带,顺层滑动所形成的不整合面与同期形成的滑脱裂缝、页岩层内高角度构造裂缝一起形成一个良好的网状裂缝系统,有利于页岩气的运移或聚集,顺层滑脱变形域的这种特点对页岩气的富集和保存产生重要影响。以下以重庆地区 8 口页岩气井(主要位于渝东南地区)的实际情况来探讨顺层滑脱变形域对页岩气富集和保存的意义(表 2)。

1) 钻井页岩气地质条件

重庆地区 6 口下志留统龙马溪组页岩钻井目的层厚度较大,最小的 D 井页岩层厚达 84 m,最大的 E 井页岩层厚达 142 m,平均厚度约 103 m;2 口下寒武统牛蹄塘页岩钻井目的层厚度变化较大,F 井和 G 井牛蹄塘组页岩厚度分别为 116 m 和 52 m,厚度较大。

6 口下志留统龙马溪组页岩钻井目的层平均有机碳含量变化较大。其中,B 井、D 井、E 井有机碳含量介于 1.11%~1.61%,有机碳含量一般。而 A 井、C 井和焦页 1 井平均有机碳含量介于 2.09%~2.54%,有机碳含量皆大于 2%,有机碳含量较高;2 口牛蹄塘组页岩钻井没有有机碳含量数据,但从重庆及邻区牛蹄塘组页岩气钻井测试数据来看,这 2 口井的有机碳含量应该比较高。

综合钻井目的层厚度及有机碳含量数据,8 口钻井具有相对较好的页岩气地质条件。

2) 挤压型顺层滑脱变形域对页岩气保存和富集的影响

8 口页岩气钻井中,焦页 1 井含气量最高达 1.97 mL/g,B 井含气量最高达 1.65 mL/g,A 井平均含气量为 1.23 mL/g,C 井含气量相对较低,平均含气量为 0.6 mL/g。其他 4 口井微含气或基本不含气。

岩心观察结果表明,位于背斜构造部位的焦页 1 井和 A 井发育有顺层滑脱变形域,两井含气量明显高于其它页岩气钻井;位于向斜构造部位的 B 井和 C 井地层产状平缓,岩心上未见顺层滑脱变形域,页岩含气量低于焦页 1 井和 A 井;位于向斜构造部位的 D 井、E 井、F 井和 G 井地层产状较陡,岩心上皆发育有顺层滑脱变形域,页岩微含气或基本不含气。

造成上述页岩含气量差异分布的原因在于,背斜构造部位顺层滑脱变形域所形成的顺层破碎带和网状裂缝系统成为页岩气重要的运移通道和储集空间,而向斜构造部位顺层滑脱变形域所形成的顺层破碎带和网状裂缝系统成为页岩气向临近背斜构造部位运移或向地表散失的重要通道(图 6)。因此,顺层滑脱变形域一方面通过其“天然运移通道”性质影响页岩气的保存,另一方面通过其“复杂网状裂缝系统”结构影响页岩气赋存和富集,从而形成上述页岩含气性差异性分布特征。

3) 重力型顺层滑脱变形域对页岩气保存和富集的影响

重力型顺层滑脱变形域形成于高陡构造背景,地层高陡状态下页岩气就不存在盖层条件和顶底板条件。在此背景下,重力型顺层滑脱变形域这种顺页理方向的陡倾破碎变形带非常有利于页岩气的逸散,特别是在地层出露地表的条件下页岩气散失情况较严

表 2 重庆地区部分页岩气钻井信息

Table 2 Information on part of the shale gas well drilling in Chongqing

井号	目的层	层厚/m	TOC/%	含气量/(mL·g ⁻¹)	褶皱类型	断裂	顺层滑脱变形域	埋深/m	倾角/(°)
焦页 1	龙马溪组	89	2.54	1.97	背斜	无	有	2 415	—
A	龙马溪组	118	2.25	1.23	背斜	无	有	645	13
B	龙马溪组	100	1.61	0.05~1.65	向斜	无	无	699	5
C	龙马溪组	85	2.09	0.60	向斜	无	无	1 085	~5
D	龙马溪组	84	1.11	0.10	向斜	无	有	697	21~32
E	龙马溪组	142	1.16	0.04	向斜	无	有	900	40~48
F	牛蹄塘组	116	—	差	向斜	无	有	3 744	12~20
G	牛蹄塘组	52	—	差	向斜	无	有	1 900	15~30

注:焦页 1 井资料引自文献[1]。“—”表示无数据。

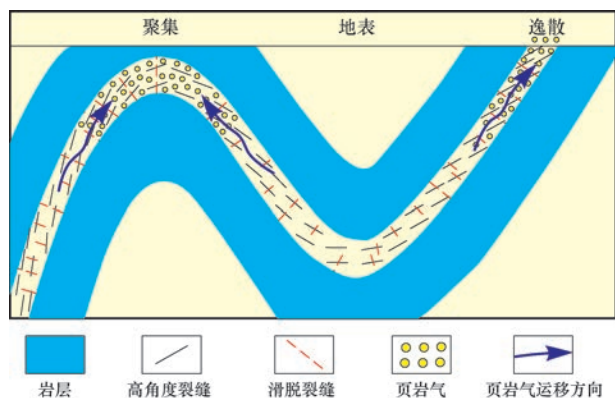


图6 顺层滑脱变形域对页岩气富集和保存影响示意图

Fig. 6 Sketch map showing influences of bedding decollement deformation domain on shale gas enrichment and preservation

重。以渝东北地区为例,现阶段勘探实践表明,渝东北地区下寒武统页岩气含气性较差,H井优质层段页岩在60℃解吸温度(约为地层温度)条件下解吸气含量小于0.04 mL/g,但在高解吸温度(约90℃)条件下解吸气量在0.31~1.22 mL/g,说明下寒武统页岩气经历了长期的散失,目的层基本不含游离气。因此,重力型顺层滑脱变形域对页岩气保存条件破坏较严重。

成岩前形成的重力型顺层滑脱变形域岩层大多并非高陡产出,顺层破碎带中的断层在泥质固结成岩过程中被压实、调整,封闭性较好。顺层滑脱破裂面与页理面类似,在成岩过程中由于压实作用等而失水收缩,形成页理缝或层理缝,但多数在后期构造改造过程中被石英、方解石等矿物充填。因此,成岩前形成的重力型顺层滑脱变形域对页岩气保存条件影响不大,但同时时页岩气富集贡献微弱。

4) 顺层滑脱变形程度对页岩气保存和富集的影响

与挤压型顺层滑脱变形域相比,重力型顺层滑脱变形域内地层变形程度相对较弱,但由于形成重力型顺层滑脱变形域的地层多呈高陡状产出,因此,重力型顺层滑脱变形域对页岩气保存条件破坏较严重。但是成岩前形成的重力型顺层滑脱变形域在后期沉积压实作用、固结成岩作用及热液流体充注影响下,对页岩气富集和保存影响较小。

对于挤压型顺层滑脱变形域,顺层滑脱变形越强,顺层滑脱变形域内断裂、裂缝越发育,顺层滑脱变形域对页岩气的沟通能力越强,向斜构造背景页岩气运移或散失更容易、彻底,不利于页岩气保存;背斜构造背景页岩气有更大的游离气储集空间,有利于页岩气富集。

5 结论和讨论

1) 埋藏深度和岩层倾角是控制同一地区同一页岩层中顺层滑脱变形域形成的关键地质要素。埋深越大,形成挤压型顺层滑脱变形域时的临界岩层倾角越大,而形成重力型顺层滑脱变形域的临界岩层倾角则越小。

2) 重力型顺层滑脱变形域对页岩气保存条件主要起破坏作用,成岩前泥质岩中形成的重力型顺层滑脱变形域对页岩气富集和保存影响不大;背斜构造部位挤压型顺层滑脱变形域所形成的顺层破碎带和网状裂缝系统是页岩气重要的运移通道和储集空间,是页岩气富集、高产的重要地质因素。向斜构造部位挤压型顺层滑脱变形域所形成的顺层破碎带和网状裂缝系统成为页岩气向临近背斜构造部位运移或向地表散失的重要通道,对页岩气保存条件破坏严重。

3) 研究区下古生界页岩储层经历了多期挤压构造应力作用,关于页岩顺层滑脱变形域形成机制分析主要基于挤压构造应力背景。在伸展构造应力条件下,页岩页理面或层理面受力状态发生明显变化,页岩沿页岩理面或层理面发生顺层滑动并形成顺层滑脱变形域的应力条件也发生变化,页岩形成顺层滑脱变形域的临界岩层倾角与页岩层埋深之间的变化规律将更加复杂,可能与上述规律有较大差别。因此,在对不同地区页岩顺层滑脱变形域进行分析时,需了解页岩层埋藏史、页岩所处古构造应力环境及其发展演化规律。

4) 渝东南地区下古生界页岩裂缝研究结果表明,页岩裂缝多分布在岩石力学层内,穿层裂缝相对不发育,页岩裂缝破坏页岩气保存条件的可能性较小^[30]。因此,顺层滑脱变形域和断裂发育程度应该是影响渝东南地区下古生界页岩气保存条件的两个主要地质因素。在渝东南地区背斜部位地层基本被剥蚀的地质背景下,向斜构造部位顺层滑脱变形域导致的侧向散失是页岩气保存条件被破坏的重要形式之一,这可能是制约渝东南地区页岩气勘探实现突破的关键因素。

5) 常规油气储层和低渗透致密油气储层中常存在泥页岩隔夹层,前人对泥页岩隔夹层中滑脱裂缝进行过一定程度的研究,但没有从顺层滑脱变形域的角度做针对性研究工作^[31~32]。显然,常规油气储层和低渗透致密油气储层中泥页岩隔夹层具备形成顺层滑脱变形域的条件,泥页岩隔夹层中形成的顺层滑脱变形域同样可以成为油气运移重要通道,并对油气富集产生影响。因此,研究泥页岩隔夹层中顺层滑脱变形域

的形成、规模和分布对常规油气储层,特别是低渗透致密油气储层勘探开发具有一定的地质意义,未来可在这方面做深入的研究工作。

参 考 文 献

- [1] 郭彤楼,刘若冰. 复杂构造区高演化程度海相页岩气勘探突破的启示——以四川盆地东部盆缘 JY1 井为例[J]. 天然气地球科学,2013,24(4):643-651.
Guo Tonglou, Liu Ruobin. Implications from marine shale gas breakthrough in complicated structural area at high thermal stage: Taking Longmaxi Formation in well JY1 as an example [J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(4): 643-651.
- [2] 郭旭升. 南方海相页岩气“二元富集”规律——四川盆地及周缘龙马溪组页岩气勘探实践认识[J]. 地质学报,2014,88(7):1209-1218.
Guo Xusheng. Rules of two-factor enrichment for marine shale gas in southern China—Understanding from the Longmaxi Formation shale gas in Sichuan Basin and its surrounding area [J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(7): 1209-1218.
- [3] 孙健,罗兵. 四川盆地涪陵页岩气田构造变形特征及对含气性的影响[J]. 石油与天然气地质,2016,37(6):809-819.
Sun Jian, Luo Bing. Structural deformation and its influences on gas storage in Fuling shale gas play, the Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(6): 809-819.
- [4] 方志雄,何希鹏. 渝东南武陵向斜常压页岩气形成与演化[J]. 石油与天然气地质,2016,37(6):819-827.
Fang Zhixiong, He Xipeng. Formation and evolution of normal pressure shale gas reservoir in Wulong Syncline, Southeast Chongqing, China [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(6): 819-827.
- [5] 金之钧,胡宗全,高波,等. 川东南地区五峰组—龙马溪组页岩气富集与高产控制因素[J]. 地学前缘,2016,23(1):1-10.
Jin Zhijun, Hu Zongquan, Gao Bo, et al. Controlling factors on the enrichment and high productivity of shale gas in the Wufeng-Longmaxi Formations, southeastern Sichuan Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(1): 1-10.
- [6] 丁文龙,李超,李春燕,等. 页岩裂缝发育主控因素及其对含气性的影响[J]. 地学前缘,2012,19(2):212-220.
Ding Wenlong, Li Chao, Li Chunyan, et al. Dominant factor of fracture development in shale and its relationship to gas accumulation [J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(2): 212-220.
- [7] 郭彤楼. 中国式页岩气关键地质问题与成藏富集主控因素[J]. 石油勘探与开发,2016,43(3):317-326.
Guo Tonglou. Key geological issues and main controls on accumulation and enrichment of Chinese shale gas [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(3): 317-326.
- [8] 郭旭升,郭彤楼,魏志红,等. 中国南方页岩气勘探评价的几点思考[J]. 中国工程科学,2012,14(6):101-105+112.
Guo Xusheng, Guo Tonglou, Wei Zhihong, et al. Thoughts on shale gas exploration in southern China [J]. Engineering Sciences, 2012, 14(6): 101-105+112.
- [9] 聂海宽,包书景,高波,等. 四川盆地及其周缘下件研究[J]. 地学前缘,2012,19(3):280-294.
Nie Haikuang, Bao Shujing, Gao Bo, et al. A study of shale gas preservation conditions for the Lower Paleozoic in Sichuan Basin and its periphery [J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(3): 280-294.
- [10] 张涛,尹宏伟,贾东,等. 下扬子区构造变形特征与页岩气保存条件[J]. 煤炭学报,2013,38(5):883-889.
Zhang Tao, Yin Hongwei, Jia Dong, et al. Structural deformation characteristics and shale gas preservation of Lower Yangtze region [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(5): 883-889.
- [11] 胡东风,张汉荣,倪楷,等. 四川盆地东南缘海相页岩气保存条件及其主控因素[J]. 天然气工业,2014,34(6):17-23.
Hu Dongfeng, Zhang Hanrong, Ni Kai, et al. Main controlling factors for gas preservation conditions of marine shale in southeastern margins of the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(6): 17-23.
- [12] 李海,白云山,王保忠,等. 湘鄂西地区下古生界页岩气保存条件[J]. 油气地质与采收率,2014,21(6):22-25+112.
Li Hai, Bai Yunshan, Wang Baozhong, et al. Preservation conditions research on shale gas in the lower Paleozoic of western Hunan and Hubei area [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(6): 22-25+112.
- [13] 马勇,钟宁宁,韩辉,等. 糜棱化富有机质页岩孔隙结构特征及其含义[J]. 中国科学:地球科学,2014,44(10):2202-2209.
Ma Yong, Zhong Ningning, Han Hui, et al. Definition and structure characteristics of pores in mylonitized organic-rich shales [J]. Science China: Earth Sciences, 2014, 44(10): 2202-2209.
- [14] 潘仁芳,唐小玲,孟江辉,等. 桂中坳陷上古生界页岩气保存条件[J]. 石油与天然气地质,2014,35(4):534-541.
Pan Renfang, Tang Xiaoling, Meng Jianghui, et al. Shale gas preservation conditions for the upper Paleozoic in Guizhou depression [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(4): 534-541.
- [15] 汤济广,李豫,汪凯明,等. 四川盆地东南地区龙马溪组页岩气有效保存区综合评价[J]. 天然气工业,2015,35(5):15-23.
Tang Jiguang, Li Yu, Wang Kaiming, et al. Comprehensive evaluation of effective preservation zone of Longmaxi Formation shale gas in the southeast Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(5): 15-23.
- [16] 徐政语,姚根顺,梁兴,等. 扬子陆块下古生界页岩气保存条件分析[J]. 石油实验地质,2015,37(4):407-417.
Xu Zhengyu, Yao Genshun, Liang Xing, et al. Shale gas preservation conditions in the Lower Paleozoic, Yangtze block [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(4): 407-417.
- [17] 于俊友,雍自权,程凌云,等. 强改造区龙马溪组页岩气保存条件指数评价[J]. 长江大学学报(自科版),2015,12(35):1-7.
Yu Junyou, Yong Ziquan, Cheng Lingyun, et al. Index evaluation of shale gas preservation conditions of Longmaxi Formation in strong reconstruction zone [J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2015, 12(35): 1-7.
- [18] 何治亮,聂海宽,张钰莹. 四川盆地及其周缘奥陶系五峰组—志留系龙马溪组页岩气富集主控因素分析[J]. 地学前缘,2016,23(2):8-17.
He Zhiliang, Nie Haikuang, Zhang Yuying. The main factors of shale gas enrichment of Ordovician Wufeng Formation-Silurian Longmaxi Formation in the Sichuan Basin and its adjacent areas [J]. Earth

- Science Frontiers, 2016, 23(2): 8–17.
- [19] 刘树根, 邓宾, 钟勇, 等. 四川盆地及周缘下古生界页岩气深埋藏—强改造独特地质作用[J]. 地学前缘, 2016, 23(1): 11–28.
Liu Shugen, Deng Bin, Zhong Yong, et al. Unique geological features of burial and superimposition of the Lower Paleozoic shale gas across the Sichuan Basin and its periphery [J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(1): 11–28.
- [20] 王濡岳, 丁文龙, 龚大建, 等. 黔北地区海相页岩气保存条件——以贵州岑巩区块下寒武统牛蹄塘组为例[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(1): 45–55.
Wang Ruyue, Ding Wenlong, Gong Dajian, et al. Gas preservation conditions of marine shale in northern Guizhou area: A case study of the Lower Cambrian Niutitang Formation in the Cen'gong block, Guizhou Province [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(1): 45–55.
- [21] 张健, 刘树根, 冉波, 等. 异常高压与页岩气保存[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2016, 43(2): 177–187.
Zhang Jian, Liu Shugen, Ran Bo, et al. Abnormal overpressure and shale gas preservation [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2016, 43(2): 177–187.
- [22] 曾联波, 肖淑蓉. 低渗透储集层中的泥岩裂缝储集体[J]. 石油实验地质, 1999, 21(3): 266–269.
Zeng Lianbo, Xiao Shurong. Fractures in the mudstone of tight reservoirs [J]. Experimental Petroleum Geology, 1999, 21(3): 266–269.
- [23] 曾联波, 漆家福, 王永秀. 低渗透储层构造裂缝的成因类型及其形成地质条件[J]. 石油学报, 2007, 28(4): 52–56.
Zeng Lianbo, Qi Jiafu, Wang Yongxiu. Origin types of tectonic fractures and geological conditions in low-permeability reservoirs [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(4): 52–56.
- [24] 龙鹏宇, 张金川, 唐玄, 等. 泥页岩裂缝发育特征及其对页岩气勘探和开发的影响[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(3): 525–532.
Long Pengyu, Zhang Jinchuan, Tang Xuan, et al. Feature of muddy shale fissure and its effect for shale gas exploration and development [J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(3): 525–532.
- [25] 刘平, 陈书平, 刘世丽, 等. 苏北盆地阜宁组泥页岩裂缝类型及形成期次[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2014, 29(6): 13–20.
Liu Ping, Chen Shuping, Liu Shili, et al. Types and forming epochs of the fractures in the shale of Funing Formation of Subei Basin [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2014, 29(6): 13–20.
- [26] 周雁, 袁玉松, 邱登峰. 泥页岩构造裂缝形成演化模式——以四川盆地东部泥页岩为例[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(5): 828–834.
Zhou Yan, Yuan Yusong, Qiu Dengfeng. A discussion on formation and evolutionary pattern of shale structural fracture: A case study of shale gas in western Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(5): 828–834.
- [27] 胡望水, 李涛, 于水, 等. 西非被动大陆边缘重力滑脱构造发育演化及成因机制[J]. 大地构造与成矿学, 2012, 36(2): 186–196.
Hu Wangshui, Li Tao, Yu Shui, et al. Tectonic revolution and forming mechanism of gravitational decollement structures in the passive continental margin of west Africa. [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2012, 36(2): 186–196.
- [28] 李涛, 胡望水, 于水, 等. 西非被动大陆边缘重力滑脱构造体系下的塑性构造[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2016, 32(4): 31–36.
Li Tao, Hu Wangshui, Yu Shui, et al. Ductile structures in gravitational decollement structure system at passive continental margin of west African [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2016, 32(4): 31–36.
- [29] 白博, 康洪全, 程涛, 等. 巴西东北部海域盆地重力滑脱构造体系特征[J]. 海洋地质前沿, 2016, 32(4): 31–36.
Bai Bo, Kang Hongquan, Cheng Tao, et al. Gravity decollement structural system in offshore basins of northeast Brazil [J]. Marine Geology Frontiers, 2016, 32(4): 31–36.
- [30] 岳锋, 焦伟伟, 郭淑军. 渝东南牛蹄塘组页岩裂缝及其分布控制因素[J]. 煤田地质与勘探, 2015, 43(6): 39–44.
Yue Feng, Jiao Weiwei, Guo Shujun. Controlling factors of fracture distribution of shale in Lower Cambrian Niutitang Formation in southeast Chongqing [J]. Coal Geology & Exploration, 2015, 43(6): 39–44.
- [31] 高磊, 明君, 闫涛, 等. 地震属性综合分析技术在泥岩隔夹层识别中的应用[J]. 岩性油气藏, 2013, 25(4): 101–105.
Gao Lei, Ming Jun, Yan Tao, et al. Application of seismic attribute analysis technique to the identification of mudstone interbeds [J]. Lithologic Reservoirs, 2013, 25(4): 101–105.
- [32] 丁世梅, 季民, 史洁, 等. 泥岩隔夹层类型及剩余油控制研究[J]. 江汉石油学院学报, 2004, 26(4): 130–131+144.
Ding Shimei, Ji Min, Shi Jie, et al. Types of mudstone barriers and its residual oil control [J]. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 2004, 26(4): 130–131+144.

(编辑 张亚雄)