# 川东南地区页岩储层开采条件对比分析

张骞', 岳晓晶<sup>2</sup>

(1. 中国地质科学院矿产综合利用研究所,四川 成都 610041;

2. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院,北京 100083)

**摘要:**近年来,四川盆地作为我国页岩气富集区域被持续探索与广泛开发。本文主要从沉积环境、构造 地质背景及岩石类型等方面将川东南地区页岩区开采情况进行了详细地对比与分析,发现中美海相页岩沉积环 境类似,四川盆地经历的构造演化更为复杂;鄂尔多斯盆地陆相页岩地层较四川盆地更为简单稳定,且埋藏 浅,孔隙度小,页岩特征差别较大;川东南威远、长宁及昭通三个区块的页岩特性基本类似,但不同构造单元 的裂隙发育程度、连通程度、盖层条件和地下水赋存等均有不小的差异。川东南页岩气田与其他页岩气田均存 在一定的差异性,不能完全照搬已有的开采经验,且开采过程中存在引发压裂液及返排液泄露等地下水污染风 险的可能。

关键词:页岩气;构造演化;沉积;地下水;水力压裂
doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2022.05.019
中图分类号:TD11 文献标志码:A 文章编号:1000-6532(2022)05-0109-11

页岩气是指赋存于以富有机质页岩为主的储 集岩系中的非常规天然气,作为一种新型天然气 资源受到广泛关注,对比常规储层气,其运移距 离极短甚至不存在[1]。美国最早发现页岩气,开发 页岩气已有80年的历史,除美国之外,我国是第 二个将页岩气成功产出并投入量化使用的国家。 虽然页岩气在开采上不及传统天然气方便、简 单,但随着人类对天然气资源使用量的增加,合 理有效地开发利用页岩气,是为落实碳达峰碳中 和目标、推动绿色低碳优势产业聚力成势提供坚 实的资源保障,是我国保障能源供应和发展低碳 经济的必然选择。在满足社会经济发展对清洁能 源的巨大需求之外,大量开采页岩气对控制温室 气体排放,构建资源节约、环境友好的生产方式 和消费模式都具有重要作用,对改善居民用能环 境,提高生态文明水平也具有重要的现实意义。

页岩不仅是页岩气的源岩,还作为储层和盖 层,具有自生自储,原地成藏的特点,其孔隙度 和渗透率极低,开采时须进行水力压裂增产改 造,简单地说,水力压裂就是利用外部施压将水 力压裂液注入储层岩石,携带支撑剂和化学添加 剂将裂缝撑开,使得压力释放后,保持页岩气可以 沿断裂稳定流动的路径。若注入的压裂液和储集 层高矿化度地层水是向上运移,便会直接污染地 下水,此问题的关键在于页岩储集层和地下水的 连通性,以及向上运移的驱动力<sup>[2]</sup>,因此我们要研 究开采层所处的沉积环境、构造背景以及后期构 造演化等多方面因素对其连通性的影响。

为了研究我国页岩气开发过程中的地下水环 境污染风险,本文将对比我国四川盆地龙马溪组海 相页岩和鄂尔多斯盆地延长组陆相页岩(表1)<sup>[3]</sup>, 分析其相似性与特殊性。另外,本文将进一步以 威远、昭通和长宁为代表地区,对比分析四川盆 地内部不同的页岩气开采区地质构造特征的差异 性,以揭示四川盆地页岩气开采压裂过程中,受 其地质构造条件影响所产生的地下水污染风险。

由表1可知,中国龙马溪组页岩和美国 Barnett页岩及 Marcellus 页岩,沉积环境类似,但

收稿日期: 2022-05-30

**基金项目**:国家科技重大专项"页岩气等非常规油气开发环境监测与保护关键技术"(2016ZX05040)项目资助 作者简介:张骞(1988-),男,硕士研究生,主要研究方向为地质战略研究。 通信作者: 岳晓晶(1989-),女,博士研究生,主要研究方向为非常规油气开发地下水环境影响。

具有一定的差异性,这与中美页岩构造复杂程度 不同有关。美国 Barnett 页岩及 Marcellus 页岩普 遍埋深比中国页岩储层浅,页岩储层厚度变化 小,开采难度较小,页岩气赋存较好。而中国龙 马溪组页岩经历了多次构造运动,导致其埋深更 深、页岩储层普遍被压缩更密实,导致页岩储层 渗透率更低,压力系数更大。龙马溪组页岩深埋 大于 Barnett 页岩且具有更高的热成熟度,但远不 如 Marcellus 页岩有机质含量高、微裂缝发育,这 导致了页岩气开发困难、钻井和水力压裂的高成 本以及不可类比的开采压裂及返排过程中的污染 问题。

表 1 中美页岩主要特征对比<sup>[3]</sup> Table 1 Comparison of main characteristics of shale between China and US

|                 | 埋深/m      | 厚度/m              | 孔隙度/%               | 热成熟度<br>R <sub>0</sub> /% | 渗透率/<br>(×10 <sup>-3</sup> µm <sup>2</sup> ) | 压力系数      | 保存条件                       | 构造运动  | 地表条件      |
|-----------------|-----------|-------------------|---------------------|---------------------------|--|-----------|----------------------------|---|-----------|
| Barnett<br>页岩   | 1980~2590 | 30~180<br>(平均107) | 4~5                 | 0.5~2.1                   | < 0.001                                      | 0.99~1.01 | 上下覆均为致密<br>灰岩              | 北美地台构造稳定,地史中经历的<br>大型构造活动几乎没有   | 平原或<br>丘陵 |
| Marcellus<br>页岩 | 1220~2591 | 15~60             | 10                  | 1.2~3.5                   | < 0.001                                      | 0.9~1.4   | 上覆: 页岩; 下<br>覆: 致密灰岩       | 北美地台构造稳定,地史中经历的<br>大型构造活动几乎没有   | 平原或<br>丘陵 |
| 龙马溪组<br>页岩      | 1500~4000 | 25~120            | 3~10<br>(4.75)      | 1.5~3.0                   | $0.00001 \sim 0.00009$                       | 1.0~2.3   | 上覆: 黏土质<br>页: 岩下覆:<br>致密灰岩 | 中-上扬子经历:加里东期、海西<br>期、印支期、燕山期、喜马拉雅期<br>等5次大型构造运动。四川盆地外<br>总体为构造变形、褶皱强烈、断层<br>发育,盆地内处于相对稳定沉降区 | 高山和<br>丘陵 |
| 延长组<br>页岩       | 500~2000  | 25~130            | 0.1~13.14<br>(4.69) | 0.5~0.8                   | 0.003~1.49<br>(0.157)                        | 0.75~0.85 | 上覆: 泥岩; 下<br>覆: 泥岩和页岩      | 经历了加里东运动、印支运动及燕<br>山运动等,整体上升,持续沉降,<br>较为稳定  | 高原和<br>沙漠 |

1 中国鄂尔多斯海相盆地页岩特征 及页岩气开发现状

#### 1.1 沉积环境和构造地质背景

鄂尔多斯盆地是在华北古生代克拉通浅海台 地基础上发育起来的大型陆内叠合型盆地<sup>[4]</sup>,基底 是太古界和下元古界变质岩系,发育石炭-二叠系 山西组、太原组、本溪组及上三叠系延长组等多 套富有机质页岩<sup>[5]</sup>,其中延长组是一套内陆湖泊一 三角洲沉积体系形成的,处于深湖-半深湖沉积 环境<sup>[6]</sup>。

鄂尔多斯盆地主要的地质构造特征是整体上 升、持续沉降、接触整合。盆地内,区域坳陷复 合、地质构造平缓,缺少背斜与断层,总体上呈 东部翘起向西部倾伏的区域性斜坡面貌;沉积盖 层时代较全,仅缺失志留系、泥盆系及下石炭 统,平均沉积岩厚度 5000 m<sup>[7]</sup>。早远古代华北地 台形成后,自奥陶纪以来,盆地主要经历了加里 东运动、印支运动及燕山运动等构造运动,具体 构造运动特点见表 2。

#### 1.2 构造类型

鄂尔多斯盆地内部断层不发育,比较稳定, 周围为一系列小型断陷盆地所环绕,主要的构造 均位于盆地边缘(图1),其中西缘的构造特征相 对复杂,断裂系统十分发育,包括16条主断裂, 其中主干断裂三条:六盘山西缘大断裂、青铜峡 一固原深大断裂、车道—阿色浪断裂,西部的天 环凹陷构造运动相对强烈和埋深也较大,有些地 方形成一些常规油气藏;但鄂尔多斯盆地油气资 源还是主要分布在伊陕斜坡(盆地主体构造) 上,该构造单元构造平缓,大致呈现由东向西倾 斜约1°左右的,东高西低,北高南低的分布格 局,主要包括鼻隆、穹窿、背斜、挠曲等4种基 本类型,其中鼻状构造是其基本的构成单元,其 断面形态呈现出连续和反复的具一定起伏的坡折 特性<sup>18</sup>,对油气聚集及大中型油气田形成过程具有 控制作用。

#### 1.3 沉积盖层

鄂尔多斯盆地西南部的彬长区块晚三叠世沉 积了延长组地层,位于渭北隆起和伊陕斜坡结合 部位,烃源岩生烃条件良好,埋藏深度较小,在 纵向上构成了4套生-储-盖组合,根据源-储配置 关系及生储盖层叠置样式将生储盖组合划分为连 续型(II和III)和间断型(I和VI),其中间断 型生储盖组合油气富集主要受控于油源断裂、源-储距离和有利储层展布;连续型生储盖组合油气 富集主要受控于张家滩页岩与有利储层展布和断 层-裂缝系统发育程度,其油气充注与保存条件均 较好,比间断型的油气富集程度更高,同时盖层 的好坏不仅取决于盖层厚度,还取决于其横向连 续性,如彬长区块长7油层组在厚度大于20m的

| まり   | 四川分地和鄂尔多斯分地主要构造旋同活动对比   |
|------|-------------------------|
| 12 4 | - 臼川重地伸起外少利重地工女何但灰白石幼月6 |

Table 2 Comparison of main structural cycles in the Sichuan Basin and the Ordos Basin

| 包括晋宁运动和澄江运动,以晋宁运动为主   | 晋宁运动形成统一中国地台  |
|---|---|
| 要包括三期的运动:影响四川地区明显的主要是第一<br>(震旦纪末期)和第三期(志留纪末期)的运动,前<br>主要表现为大规模的抬升运动,后者使四川地区发育<br>型隆起和坳陷,并伴有不同组系的深断裂活动,从而<br>改基底产生不均衡块断活动,对后期构造演化产生重<br>要影响  | 影响鄂尔多斯盆地的主要是加里东运动第一期(早奧陶<br>纪马家沟末期)和加里东运动晚期(奧陶纪末期),使<br>鄂尔多斯陆块抬升,形成海退,全区成为剥蚀区从而使<br>华北地台缺失中晚奧陶世、志留纪、泥盆纪、早石炭世<br>的沉积,形成奥陶系顶部风化壳古岩沼带。   |
| 古生代第二个构造旋回,性质上属于地壳张裂活动伴<br>的升降运动,主要表现为地层的缺失和上下地层组之<br>间呈假整合接触。  |   |
| 上扬子准地台的重要地质事件,主要发生在三叠纪,<br>舌中三叠纪末的早印支运动和晚三叠纪末的晚印支运<br>地壳从张裂活动转为压扭活动,结束了海相地台的<br>沉积,而转变为陆相沉积。  | □中文运动第Ⅱ幕(中三叠纪末)造成中晚三叠世地层间<br>断,晚三叠世地层缺失,盆地北部抬升,西缘坳陷继续<br>下陷,盆地中心也开始下陷,鄂尔多斯地区开始全面地<br>进入了典型的内陆盆地发展期;印支运动第Ⅲ幕(晚三叠<br>世末),盆地一度抬升,造成上三叠统部分地层被剥蚀。   |
| 快罗纪至白垩纪的构造运动,是上扬子地区陆相沉积发<br>1主要阶段。以侏罗纪末的中燕山运动最明显,使盆地再<br>1隆,而周边开始向盆地内压缩,褶皱并抬升。盆内则主<br>1现为区域性抬升,造成侏罗系上部地层被大幅度剥蚀。<br>更指发生在新生代的构造运动,是四川盆地内最强列  | 燕山运动的第Ⅱ幕(中侏罗纪末期),使中下侏罗纪发生了<br>强烈的褶皱和断裂,并使鄂尔多斯台坳上升成为剥蚀区。   |
| 金山运动,包括早喜山运动,发生在新近纪以前,是<br>向四川构造盆地和局部构造形成的主要时期,使震旦<br>至古近纪以来的沉积盖层全面褶皱,并将不同时期、<br>同地域的褶皱和断裂连成一体;另一次为晚喜山运<br>发生在新近纪以后,第四纪之前,该运动使得早喜<br>期形成的构造进一步得以加强和改造,使四川盆地的<br>造面貌最终定型,而这些对四川盆地内油气藏的形成<br>及碱在位置都且有很重要的影响 | 除了周缘地带外,新构造运动对鄂尔多斯盆地腹部地区构<br>造变形很轻微 <sup>国</sup> 。  |
| 一度(主葉第一世代 上記 行力计算程序室计 封建一   | 包括晋宁运动和澄江运动,以晋宁运动为主<br>包括三期的运动:影响四川地区明显的主要是第一<br>(震旦纪末期)和第三期(志留纪末期)的运动,前<br>要表现为大规模的抬升运动,后者使四川地区发育<br>]隆起和坳陷,并伴有不同组系的深断裂活动,从而<br>女基底产生不均衡块断活动,对后期构造演化产生重<br>要影响<br>5生代第二个构造旋回,性质上属于地壳张裂活动伴<br>的升降运动,主要表现为地层的缺失和上下地层组之<br>间呈假整合接触。<br>:扬子准地台的重要地质事件,主要发生在三叠纪,<br>6中三叠纪末的早印支运动和晚三叠纪末的晚印支运<br>地壳从张裂活动转为压扭活动,结束了海相地台的<br>沉积,而转变为陆相沉积。<br>侏罗纪至白垩纪的构造运动,是上扬子地区陆相沉积发<br>主要阶段。以侏罗纪末的中燕山运动最明显,使盆地再<br>隆,而周边开始向盆地内压缩,褶皱并抬升。盆内则主<br>现为区域性抬升,造成侏罗系上部地层被大幅度剥蚀。<br>5指发生在新生代的构造运动,是上扬子地区陆相沉积发<br>直边定以来的沉积盖层全面褶皱,并将不同时期、<br>同地域的褶皱和断裂连成一体;另一次为晚喜山运<br>发生在新近纪以后,第四纪之前,该运动使得早喜<br>引形成的构造进一步得以加强和改造,使四川盆地的<br>词 铜最终定型,而这些对四川盆地内油气藏的形成<br>及赋存位置都具有很重要的影响。 |

盖层中所占比例最大,反映出其沉积时期湖盆 水体较深,故其横向连续性相对其他油层组 较好<sup>[10]</sup>。

由此可知,鄂尔多斯盆地具有华北地台的一级 构造单元,页岩埋深浅,且地质构造简单、稳定。

2 四川盆地及川东南不同开采区页 岩及地质特征

#### 2.1 四川盆地

2.1.1 沉积环境和构造地质背景

四川盆地总体在缺氧环境沉积,发育有川 北、川东—鄂西和川南3个深水沉积区,其中五 峰组—龙马溪组页岩的沉积环境为浅水陆棚亚 相,处于弱氧化—弱还原环境。

整个四川盆地沉积盖层具有海相和陆相双层 结构,从沉积特征上来说,从张裂环境转化为压 缩环境;从构造演化上来说,震旦系到中三叠系 之间存在多个沉积间断面,但区域上未见角度不 整合,各层系之间均呈平行叠置,即地层多长期 处于台地相,并且总体以下陷接受沉积为主。

自震旦系以来,四川盆地经历的构造活动较

频繁,从基底算起,可以追溯划分为6个主要的 构造旋回:扬子运动、加里东运动、海西运动、 印支运动、燕山运动和喜马拉雅运动(表2):在 加里东期和海西期,地壳的运动受张裂活动影响 而呈升降运动,但没有与挤压活动有关的褶皱运 动;从晚中生代燕山运动开始,发生较强烈的压 扭性构造运动,从而导致盆地内断褶构造开始发 育; 早喜山运动是影响整个四川构造盆地和局部 构造形成的主要时期,特别是喜马拉雅运动,它 使震旦纪至古近纪以来的沉积盖层全面褶皱,并 将不同时期、不同地域的褶皱和断裂连成一体; 晚喜山运动发生在新近纪以后、第四纪之前,该 运动将早喜山期形成的构造进一步加强和改造, 使四川盆地的构造面貌最终定型。多次的构造运 动使四川盆地的褶皱发育,并且伴随着褶皱过 程,易产生次级断裂等,使得四川盆地的构造背 景更为复杂。

对比四川盆地和鄂尔多斯盆地,两者均经历 了多次构造运动,但四川盆地比起鄂尔多斯盆地 所经历的构造运动更为复杂,其构造面貌受到的 影响更大,在漫长的构造与沉积演化过程中,经



图 1 延长组顶部低幅度构造特征 (改编<sup>[9]</sup>) Fig.1 Characteristics of low-amplitude structure at the top of Yanchang Formation (adapted <sup>[9]</sup>)

历了多期和多向的边缘深断裂活动,具有多旋回 的特点,特别是印支运动、燕山运动和喜马拉雅 运动,对整个四川盆地的改造有着极为关键的作 用;而鄂尔多斯盆地以整体升降为主,内部构造 稳定,特别是在新生代时期,新构造运动主要对 其周缘影响较大,其内部缓慢抬升,处于稳定状 态,转为周边断陷发育。

#### 2.1.2 断裂展布、褶皱类型及其发育程度

四川盆地是由多条深大断裂围成的沉积盆

地,基本都是基底断裂和壳断裂,具有纵向切割 深、规模大、延伸远的特点,大体上将这些深大 断裂分为北东、北西及南北向三组。其中会影响 昭通页岩气开采区的深大断裂-华蓥山断裂带 (F4)是一个继承性的大断裂,由三条隐伏壳内 断裂组成,在地史上多次发生活动,特别是燕山 晚期至喜马拉雅期在川东压扭应力作用下的活 动,被断层活动改造,是川东断褶带和川中平缓 构造区的分界线;遵义-松坎断裂带(F12)是划分 川东与川南的分界断裂;七曜山断裂带(F5), 是由三条东倾的逆冲断裂组成的,通过断裂两侧 基底的差异,说明晋宁期已经存在,而燕山晚期 到喜马拉雅期,在南东-北西方向的挤压应力下又 重新活动,成为逆冲断裂,断层两侧的沉积盖层 其构造变形的样式和强度都具有较大的差别,东 侧为隔槽式褶皱,变形程度较低,西侧为隔挡 式褶皱,变形程度较高,并伴有大量断层的 出现<sup>[11]</sup>。

川东南地区褶皱发育,但是不同构造位置发 育程度不同,将其进一步分为三个四级构造单元:

(1)边部强烈变形区-褶皱变形强烈,多为线 状或狭长状的高褶皱,呈梳状或带状分布,伴生 断层发育,且多数通达地表,地表裂缝发育程 度高;

(2)中部中等变形区-褶皱变成程度中等,多为短轴状的中褶皱,基本无贯通性断层,地表裂缝发育程度中等;

(3)中央弱变形区-褶皱变形程度较弱,多为 低褶皱,呈短轴或近等轴状,断层和地表裂缝发 育程度较弱。

2.1.3 沉积盖层

盖层是油气藏形成的必要条件,其好坏也对 环境污染具有关键意义,分为直接盖层和间接盖 层。对于上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组页岩 气藏来说,中下三叠统膏盐岩、泥岩发育的地区 可以形成一定范围的压力封闭,从而使得页岩气 得以保存。例如,四川盆地内部的长宁地区保存 了部分三叠系膏盐,以宁 201 井为例,开孔层位 为嘉陵江组四段、保存了部分嘉陵江组四段和嘉 陵江组三段膏盐岩,龙马溪组页岩的气藏压力系 数是 2。

对于注入目标储层的压裂液是否会在垂向运 动影响到上部含水层引起环境风险,直接盖层是 关键,即页岩层之上的各种致密岩层,包括页 岩、粉砂质页岩、泥质粉砂岩和灰岩等,它们的 岩性、物性参数及参数之间的差异性将直接决定 盖层的封闭能力和被压裂后连通的可能性。一般 优质开采层的平均孔隙度大,且其直接盖层有较 好的封闭能力,如下志留统龙马溪组之上的小河 坝组(石牛栏组)和韩家店组的泥页岩就是较好 的直接盖层,根据前人对四川盆地建深1井、五 科1井和太13井的志留系小河坝组和韩家店组的 砂岩样品孔隙度分析,建深1井韩家店组3块极 细粉砂岩孔隙度为0.48%~2.9%,平均为1.55%, 12块粉砂岩孔隙度为0.48%~2.9%,平均为1.55%, 12块粉砂岩孔隙度为0.4%~1.1%,平均为 0.64%<sup>[12]</sup>,明显小于龙马溪组黑色页岩的孔隙度; 而从页岩矿物组成的角度,五峰组-龙马溪组页岩 自下而上的石英含量减少,粘土矿物含量增加, 也就是说开采层上部的页岩,塑性增强,那么同 样的受力大小下,压实作用更强,孔隙度更小, 排驱压力会增加,在压裂及返排过程中,使压裂 液向上运移的程度减小,压裂液或返排液不易窜 入水层污染地下水,减少对土壤的扰动,以至于 污染土壤表层或浅层地表<sup>[13]</sup>。

#### 2.2 威远与长宁-昭通区块

威远与长宁-昭通区块的沉积环境类似,都是 早期是深水陆棚,晚期为浅水陆棚代替;长宁-昭 通区块龙马溪组页岩富硅质(硅质储量高于 40%)、脆性矿物含量较高,易于压裂产生网状 缝,具有较好改造的特点<sup>[14]</sup>,但其主要发育基质 孔隙,孔隙度平均约为5%,仅局部存在裂缝孔 隙,多发育层间缝,开发难度较大<sup>[15]</sup>。威远地区 龙马溪组页岩储层主要发育有机质孔、无机质 孔、微裂缝,由于龙马溪组页岩深埋藏、强隆 升、高演化等特点,压实作用、成岩作用明显, 导致有机质孔隙发育,局部连通性好;无机质孔 隙相对不发育,多为孤立孔隙,连通性差;层间 缝、部分构造缝发育,且延伸范围广,连通性 好。因此,有机质孔、裂缝是该地区页岩气储层 主要渗流运移的通道<sup>[16]</sup>。

威远地区在构造上主要位于川中隆起区乐山-龙女寺古隆起的东南斜坡带上,包括川南古坳中 隆低陡构造区带及川西南中古斜坡低陡构等,乐 山-龙女寺古隆起轴部控制着威远地区龙马溪组沉 积作用,为大型穹窿状背斜构造<sup>[17-18]</sup>。威远构造的 形成经历了整体抬升、整体下沉以及基底变形: 从寒武系至奥陶系一直呈现北西高南东低的构造 形态;志留系经历了加里东运动,地层抬高,遭 受剥蚀,穹窿构造初态形成;泥盆纪一石炭纪时 期,继续隆升,在志留系与二叠系之间出现了沉 积间断;二叠系沉积前,威远地区受运动影响开 始下沉入水底接受沉积,期间构造稳定、沉积较 为平缓;之后的喜山运动使威远地区基底卷入变

#### 形,快速褶皱隆升形成背斜<sup>[19]</sup>。

四川盆地水文地质特征极其复杂,地下水类 型包括松散岩类孔隙水、碳酸盐岩岩溶水、基岩 裂隙水以及浅层地下水,其中基岩裂隙水又可分 为碎屑岩类孔隙裂隙水、变质岩裂隙水和岩浆岩 裂隙水,再进一步按照地下水赋存空间性质和水 动力特征划分,可将碎屑岩磊孔隙裂隙水分为裂 隙水、可溶性溶孔(洞)裂隙水和层间裂隙水, 其中可溶性溶孔(洞)裂隙水主要分布在威远穹 窿北西翼外围<sup>[20]</sup>。昭通地区岩类发育齐全,地层 复杂,为碳酸盐岩夹碎屑岩类互层,主要赋存岩 溶裂隙水,具有岩溶水、裂隙水双重水文地质特 征<sup>[21]</sup>,长宁地区也主要赋存岩溶水。

#### 2.3 长宁区块与昭通区块对比

长宁-昭通区块位于川南深水陆棚沉积中心部 位,其中长宁处于川南和渝东沉积中心,昭通示范 区则处于川南沉积中心的南缘,其五峰组—龙马溪 组页岩静态地质条件相对长宁地区略差<sup>[22]</sup>。两者 产层均为钙质深水陆棚相页岩,但构造样式存在 差异,长宁位于四川盆地承压区正向构造带,形 成于燕山—喜马拉雅期断裂褶皱期,其主体位于 四川盆地南缘长宁背斜南斜坡——向斜区(见 图 2), 总体为一个大型宽缓向斜内的马鞍型构 造,裂缝形成机制与喜马拉雅期构造强烈褶皱反 转和页岩层大面积滑脱变形作用有关,其页岩层 基本未发生滑脱变形作用[13],见北东向张性断裂 但通天断层不发育,保存条件优越,但在长宁背 斜核心区(即狮子山背斜),五峰组-龙马溪组 已出露地表并遭受剥蚀,通天断层发育,保存条 件存在较大风险[15]。

昭通示范区黄金坝区块位于四川台坳川南中-低陡褶皱带(图2中III<sub>2</sub>)罗场复向斜建武向斜边 缘<sup>[23]</sup>,褶皱系数较小,约为0.35~0.05,多为短轴 褶皱,翼部地层产状相对较缓、断层不发育。其沉 积盖层从震旦系到侏罗系,厚约6000~7000 m, 其碳酸盐岩、硅质矿物含量明显低于储层。

以YS108H1水平井组(图3)为例进行对比 分析,其位于四川台坳川南低陡褶带南缘,北接 四川盆地,南与滇黔北坳陷相邻(图4),受燕山 期太平洋—古特提斯洋与扬子板块碰撞、喜马拉 雅期印度板块向北冲挤双重作用的影响,形成近 东西向和近南北向共同剪切的构造格局,构造形 变从滇东黔中隆起到滇黔北坳陷再到四川盆地由 强到弱<sup>[24]</sup>。

YS108H1 水平井组处于帚状构造带末端,构造作用相对较弱,构造形态相对简单(图 5)。 图 6表明,YS108H1 水平井组地层产状较平缓, 地层分布稳定,构造平缓,处于建武向斜南翼靠 底部部位,为页岩气有利保存区,在水平井部署 的向斜区域地层稳定,过井剖面显示井轨迹无明 显断层通过;加之其位于向斜和背斜的转折部 位,地层封闭性较好,有效地阻止了页岩气的侧向 迁移,有利于页岩气资源的保存<sup>[23]</sup>。

长宁-昭通区块龙马溪组页岩富硅质(硅质储 量高于 40%)、脆性矿物含量较高,易于压裂产 生网状缝,具有较好改造的特点<sup>[14]</sup>,但其主要发 育基质孔隙,孔隙度平均约为 5%,仅局部存在裂 缝孔隙,多发育层间缝,开发难度较大<sup>[15]</sup>。四川 盆地内部长宁地区主要发育裂缝类型以层理缝和 高角度充填缝为主,裂缝分布密度低,天然裂缝 欠发育;四川盆地周缘构造运动相对剧烈,受盆 地边缘构造运动影响,主要发育高角度张开缝, 常见缝面划痕;裂缝分布密度较大,天然裂缝较 发育,整体上,昭通区块天然裂缝发育程度高于 长宁<sup>[25]</sup>。

## 3 页岩气开采过程中的地下水环境 问题

根据目前总结的页岩气开发经验,开采过程 中涉及到的地下水环境的主要是泄漏问题,泄漏 成分包括气体、压裂液以及返排液等,见图 7。如 果管路密封不良,或者是遇到断层及裂缝区,压 裂液及页岩气可能会窜入水层并对地下水造成 影响<sup>[13]</sup>。

压裂结束后因地质构造的不同会有 10%~70% 的压裂液返排至地表,但仍有部分压裂液残留在 地层。这些压裂液中的有毒物质可能直接通过断 裂、裂缝系统自地下深处缓慢向上迁移,直接污 染地下水<sup>[26]</sup>,这个问题是水力压裂技术争议的焦 点。此问题的关键在于页岩储集层和地下水的连 通性,以及向上运移的驱动力,目前学术界较为 普遍的共识是水力压裂不会产生连通地表的裂 缝,且受毛细管力限制,液体缺少足够向上运移 的动力<sup>[27]</sup>,但四川盆地经历了多期构造运动,地



图 2 长宁五峰组-龙马溪组页岩气藏构造剖面图(北东-南西向)

Fig.2 Structural profile of shale gas reservoirs in Wufeng-Longmaxi Formation, Changning (NE-SW direction)



图 3 YS108H1、H6 水平井组井场自然地理及交通位置 Fig.3 Well site physical geography and traffic location map of YS108H1 and H6 horizontal well groups



图 4 YS108H1 水平井组井区域构造单元划分 Fig.4 Structure unit division map of YS108H1 horizontal well group



图 5 YS108H1 水平井组井区域地质 Fig.5 Geological map of YS108H1 horizontal well group well area



图 6 YS108H1 水平井台区域志留系龙马溪组底界构造 Fig.6 Bottom boundary structure map of Silurian Longmaxi Formation in horizontal well platform area YS108H1

质构造复杂,可以借鉴美国相关经验,但不可完 全照搬,况且已知1例发生在美国怀俄明州的致 密砂岩气藏的事故,在浅层地下水中检测到压裂 液成分。

### 4 结 论

(1)通过对比中美页岩地质特征,即中国龙 马溪组页岩和美国 Barnett 页岩、Marcellus 页岩, 发现三者沉积环境类似,同时具有一定的差异 性,中美页岩构造复杂程度不同,龙马溪组页岩 深埋大于 Barnett 页岩且具有更高的热成熟度,但 远不如 Marcellus 页岩有机质含量高、微裂缝发 育,这导致了页岩气开发困难、钻井和水力压裂 的高成本以及不可类比的开采压裂及返排过程中 的污染问题。

(2)通过对比中国陆相和海相页岩地质特征,即四川盆地龙马溪组页岩和鄂尔多斯盆地延长组页岩,两者分别为扬子地台和华北地台的一



图 7 页岩气开发相关的地下水风险示意 Fig.7 Groundwater risks associated with shale gas development

级构造单元,沉积环境不同,四川盆地较之鄂尔 多斯盆地构造复杂,褶皱断裂体系发育,而鄂尔 多斯盆地页岩埋深浅,且地质构造简单、稳定。

(3)川东南几个页岩气开发区块对比表明, 威远区块和长宁-昭通区块以及长宁区块和昭通区块,虽然同处川东南地区且页岩特性相似,但由于位于不同构造部位,威远位于背斜核部,而长宁、昭通属向斜构造,且昭通处于四川盆地边缘,而威远和长宁处在川南沉积中心,天然裂缝发育程度、地下水类型和特性以及连通程度、盖层特性等均有不同,故在地下水脆弱性评价,应结合不同位置区块的特点进行分析。

(4)中国的页岩气开发还处于起步阶段,但 不可忽视开采过程中可能会引发的地下水环境问 题,需要借鉴己有多年开发历史的美国页岩气田 的经验,但通过由此及彼依次对比中美页岩、四 川盆地龙马溪组页岩和鄂尔多斯盆地延长组页岩 以及四川盆地不同区块龙马溪组页岩地质特征, 发现两两之间均存在不小的差异性,我们不能完 全照搬美国页岩气开采经验,或将不同沉积环 境、不同地理位置的页岩开发简单地合并考虑,无 论是在开发方面还是处理地下水环境问题方面。

### 参考文献:

[1] 张东晓,杨婷云.页岩气开发综述[J].石油学报,2013, 34(4):792-801.

ZHANG D X, YANG T Y. An overview of shale gas production[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(4):792-801.

[2] 张东晓,杨婷云.美国页岩气水力压裂开发对环境的影响[J].石油勘探与开发,2015,42(6):801-807.

ZHANG D X, YANG T Y. Environmental impacts of hydraulic fracturing in shale gas development in the United States[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(6):801-807. [3] 王淑芳. 中美海相页岩气地质特征对比研究[J]. 天然气 地球科学, 2015, 26(9):1666-1678.

WANG S F. A Comparative study of the geological feature of marine shale gas between China and the United States[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(9):1666-1678.

[4] 张岳桥, 廖昌珍. 晚中生代—新生代构造体制转换与鄂尔 多斯盆地改造[J]. 中国地质, 2006, 33(1):28-40.

ZHANG Y Q, LIAO C Z. Transition of the late mesozoic –cenozoic tectonic regimes and modification of the Ordos Basin[J]. Geology in China, 2006, 33(1):28-40.

[5] 冯小龙, 敖卫华. 鄂尔多斯盆地中生界页岩气形成条件及勘探潜力[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(14):130-140.

FENG X L, AO W H. Shale gas accumulation condition and exploration potential of mesozoic in Ordos Basin[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(14):130-140.

[6] 杨阳. 美国页岩与鄂尔多斯盆地张家滩页岩对比研究[J]. 长江大学学报 (自然科学版) 理工, 2012, 9(12):50-52.

YANG Y. Comparative study of American shale and Zhangjiatan shale in Ordos Basin[J]. Journal of Yangtze University (Nat Sci Edit) Sci & Eng, 2012, 9(12):50-52. [7] 杨俊杰. 鄂尔多斯盆地构造演化与油气分布规律 [M]. 北京: 石油工业出版社. 2002: 228.

YANG J J. Tectonic evolution and oil-gas distributoon in the mesozoic Ordos Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press. 2002: 228.

[8] 王建民. 鄂尔多斯盆地伊陕斜坡上的低幅度构造特征及成因探讨[J]. 地学前缘, 2018, 25(2):246-253.

WANG J M. Exploring the charateristics and genesis of low amplitude on the Yishaan Slope, Ordos Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2018, 25(2):246-253.

[9] 王建民, 王佳媛. 鄂尔多斯盆地伊陕斜坡上的低幅度构造与油气富集[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(1):27-35.

WANG J M, WANG J Y. Low-amplitude structures and oil-gas enrichment on the Yishaan Slope, Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(1):27-35.

[10] 陈贺贺, 朱筱敏, 陈纯芳, 等. 鄂尔多斯盆地彬长区块延 长组生储盖组合与油气富集特征 [J]. 岩性油气藏, 2016, 28(2):56-63.

CHEN H H, ZHU X M, CHEN C F, et al. Characteristics of source-reservoir-caprock assemblage and hydrocarbon accumulation of Yanchang Formation in Binchang block, Ordos Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2016, 28(2):56-63.

[11] 吕宝凤, 川东南地区构造变形与下古生界油气成藏研究 [M]. 中国科学院研究生院 (广州地球化学研究所), 2005.

LV B F. Tectonic deformation and hydrocarbon accumulation of lower paleozoic in Southeast Sichuan[M]. Guangzhou: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Guangzhou Institute of Geochemistry), 2005.

[12] 肖开华,等.中、上扬子区志留系油气成藏特点与勘探 前景[J].石油与天然气地质,2008,29(5):589-596.

XIAO K H, et al. Hydrocarbon accumulation features and exploration direction in the Silurian of the Middle-Upper Yangtze Platform[J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(5):589-596. [13] 张文泉. 页岩气开采的环境问题及建议[J]. 广东化工, 2017, 44(2):52-53.

ZHANG W Q. Environmental problems and suggestions for shale gas mining[J]. Guangdong Chemical Industry, 2017, 44(2):52-53.

XUE H Q, WANG H Y. Adsorption capability and aperture distribution characteristics of shales: taking the Longmaxi Formation shale of Sichuan Basin as an example[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(5):826-832.

[15] 王玉满,等.四川盆地长宁、焦石坝志留系龙马溪组页 岩气刻度区精细解剖[J].天然气地球科学,2016,27(3):423-432.

WANG Y M, et al. Dissection of two calibrated areas of the Silurian Longmaxi Formation, Changning and Jiaoshiba, SIchuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(3):423-432.

[16] 咎博文. 川西南威远地区龙马溪组页岩储层孔隙发育特征及控制因素分析[J]. 地质科技情报, 2017, 36(2):65-74.

ZAN B W. Pore characteristics of shale gas reservoir of Longmaxi Formation in Weiyuan Area, Southwest of Sichuan Basin[J]. Geological Scicence and Technology Information, 2017, 36(2):65-74.

[17] 蒋裕强,等.中国海相页岩岩相精细划分及测井预测:以四川盆地南部威远地区龙马溪组为例[J].地学前缘,2016,23(1):107-118.

JIANG Y Q, et al. Fine lithofacies of China's marine shale and its logging prediction: A case study of the Lower Silurian Longmaxi marine shale in Weiyuan area, Southern Sichuan Basin, China[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(1):107-118.

[18] 包茨,杨先杰,李登湘,等.四川盆地地质构造特征及天然气远景预测[J].天然气工业,1985,5(4):1-12.

BAO C, YANG X J, LI D X, et al. Characteristics of geological structure and predication of gas prospect of Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 1985, 5(4):1-12.

[19] 喻颐,等.四川盆地威远地区构造演化特征及其对下古 生界油气富集的控制作用[J].天然气勘探与开发,2013, 36(2):1-4+16+84.

YU Y, et al. Characteristics of tectonic evolution of Weiyuan area in Sichuan Basin and its effect on lower paleozoic oil and gas reservoirs[J]. Natural Gas Exploration & Development, 2013, 36(2):1-4+16+84.

[20] 代鸿. 四川省地下水资源分布的初步分析[J]. 四川水利, 2013(6):50-53.

DAI H. Preliminary analysis of groundwater resources distribution in Sichuan Province[J]. Sichuan province water conservancy, 2013(6):50-53.

[21] 李从仁,杨艳华.云南省地下水资源分布特征及地下水 环境问题 [C],中国地质矿产经济学会 2005 年学术年会论文 集. 2005:成都. 512-516.

LI C R, YANG Y H. Distribution characteristics of groundwater resources and groundwater environmental problems in Yunnan Province[C]. Chinese Society of Geology

and Mineral Economics 2005 annual conference proceedings. 2005: Chengdu. 512-516.

[22] 王鹏万,等. 昭通示范区页岩气富集高产的地质主控因素[J]. 石油学报, 2018, 39(7):744-753.

WANG P W, et al. Main geological controlling factors of shale gas enrichment and high yield in Zhaotong demonstration area[J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(7):744-753.

[23] 伍坤宇,等. 昭通示范区黄金坝气田五峰-龙马溪组页岩 气储层地质特征[J]. 中国地质, 2016(1):275-287.

WU K Y, et al. Geological characteristics of Wufeng-Longmaxi shale-gas reservoir in the Huangjinba gas field, Zhaotong National Shale Gas Demonstration Area[J]. Geology in Chine, 2016(1):275-287.

[24] 陈志鹏, 梁兴, 张介辉. 昭通国家级示范区龙马溪组页岩 气储层超压成因浅析[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(3):442-448. CHEN Z P, LIANG X, ZHANG J H. Genesis analysis of shale reservoir over pressure of Longmaxi Formation in Zhaotong Demonstration Area, Dianqianbei Depression[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(3):442-448.

[25] 贾成业,等.页岩气水平井产量影响因素分析[J].天然 气工业,2017,37(4):80-88.

JIA C Y, et al. Key factors influencing shale gas horizontal well production[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(4):80-88.

[26] 林奇, 等. 页岩气开采对水环境的影响及其治理技术研究 议[J]. 环境科学与管理, 2017, 42(1):55-58.

LIN Q, et al. Impact and treatment technology of shale gas exploration on water[J]. Environmental Science and Management, 2017, 42(1):55-58.

[27] Engelder T, et al. The fate of residual treatment water in gas shale[J]. Journal of Unconventional Oil and Gas Resources, 2014, 9(7):33-48.

# Comparative Analysis of Shale Reservoir Exploitation Conditions in Southeast Sichuan

#### Zhang Qian<sup>1</sup>, Yue Xiaojing<sup>2</sup>

(1.Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resource, China Geological Survey, Chengdu, Sichuan,

China; 2.School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing, China) **Abstract:** In recent years, Sichuan Basin has been continuously explored and extensively developed as a shale gas enrichment area in China. This paper makes a detailed comparison and analysis of the exploitation of shale in southeastern Sichuan from the aspects of sedimentary environment, tectonic geological background and rock types. It is found that the sedimentary environment of Marine shale in the United States is similar, and the tectonic evolution of Sichuan Basin is more complex. Compared with Sichuan Basin, continental shale strata in Ordos Basin are more simple and stable, with shallow burial, small porosity and great difference in shale characteristics. The shale characteristics of Weiyuan, Changning and Zhaotong blocks in southeast Sichuan are basically similar, but there are significant differences in fracture development degree, connectivity degree, caking condition and groundwater occurrence of different tectonic units. The shale gas field in southeast Sichuan has some differences with other shale gas fields, so the existing exploitation experience cannot be copied completely, and the risk of groundwater pollution such as fracturing fluid and flowback fluid leakage may occur in the exploitation process.

Keywords: Shale gas; Tectonic evolution; Sedimentary; Groundwater; Fracturing