

## 滇黔北下古生界海相页岩气藏赋存条件评价

梁兴,叶熙,张介辉,舒红林,楼基胜,姚秋昌,王高成

(中国石油天然气股份有限公司浙江油田分公司)

**摘要** 页岩气区域地质调查和钻探成果表明,滇黔北坳陷属于改造残留型构造坳陷,海相下志留统龙马溪组和下寒武统牛蹄塘组黑色页岩发育,单层厚度达50m以上。评价区页岩的厚度、埋深、TOC、含气性、力学性质、物性和矿物成分等评价参数与北美已商业开发页岩气田的具有一定相似性,具备形成页岩气藏的有利地质条件,是现实的页岩气勘探开发重要目的层系。下古生界海相页岩受晚期构造活动影响强,有机质热演化程度高,通天断层、区域盖层剥蚀、大气淡水冲刷等严重影响其含气性,但页岩的含气性随保存条件变好和TOC丰度增大而明显增加。影响页岩气藏赋存的关键因素是页岩厚度、TOC含量、页岩气储层空间和保存条件。提出该区页岩气有利勘探区带综合评价优选时,需要综合考虑“定性定量相结合”的六个原则条件,保存条件应成为页岩气地质综合选区的重要因素。优选出彝良—筠连—叙永区域为龙马溪组和牛蹄塘组页岩气目的层叠合的有利勘探区带,赫章—镇雄区域为牛蹄塘组页岩气目的层的有利勘探区带。

**关键词** 下古生界;海相地层;页岩气藏;油气藏保存条件;油气藏评价;勘探区带优选;滇黔北地区

**中图分类号**: TE112.36

**文献标识码**: A

页岩气以吸附和游离状态赋存于富有机质的致密黑色泥页岩地层之中<sup>[1-2]</sup>,全球和中国的页岩气资源潜力巨大<sup>[3-6]</sup>。页岩气属于清洁环保型新能源,属于重要的非常规天然气。页岩气的开发利用,顺应了全球低碳经济发展的新时代要求。随着页岩气开采核心技术的成熟和不断进步,以北美为代表的全球页岩气勘探开发势头迅猛<sup>[4,7]</sup>,这对调整全球能源结构和能源供给格局意义重大,影响深远。

为了调查国内第一个页岩气勘查矿权区块——滇黔北地区的海相古生界构造地质条件和页岩气资源勘探前景,中国石油浙江油田分公司自2008年9月开始开展了系统的页岩气勘探评价,先后完成了上万千米的地质路线踏勘与构造地质剖面调查,实测和观测了数十条页岩气地质剖面,进行了4000余千米的二维地震普查勘探和100余平方千米的三维地震目标勘探;针对下古生界页岩气先后实施了3口地质资料浅井和3口页岩气井的钻探,并对其中1口井的下志留统龙马溪组实施了页岩气压裂试气。

通过大量的勘探工作投入和系统的评价研究,建立了系统的海相古生界页岩气基础资料,获得了龙马溪组页岩气流,实现了非常规天然气的突破,为滇黔北地区非常规天然气的地质综合选区评价和钻探、压裂改造与排液试采积累了实践经验。

本文以前述勘探评价实践成果为基础,参照美国页岩气勘探评价取得的成功经验<sup>[4-5]</sup>,对滇黔北研究工区下古生界页岩气赋存地质条件进行了分析评价。

### 1 强烈构造改造残留型坳陷区域地质背景

滇黔北研究工区地处云南(昭通)、贵州(毕节—遵义)、四川(宜宾—泸州)三省交会区域,大地构造上属于扬子地块构造域西南边缘的滇黔北坳陷,主体是威信凹陷的中西部区域。滇黔北研究区北与四川盆地相伴,南抵滇东黔中隆起,西与滇黔北坳陷之昭通凹陷毗邻,东到贵州习水—仁怀一线(图1)。

收稿日期:2010-07-20;改回日期:2011-08-20

本文为“十二·五”国家重大科技专项“大型油气田及煤层气开发”之“页岩气勘探开发关键技术”项目的部分成果

梁兴:1965年生,博士,高级工程师。现为中国石油浙江油田分公司副总经理兼总地质师。主要从事苏北第三系高凝油、南海相非常规气地质综合评价研究以及勘探开发生产管理。通讯地址:310023 浙江省杭州市西湖区留下街道荆山岭;电话:(0571)56318533

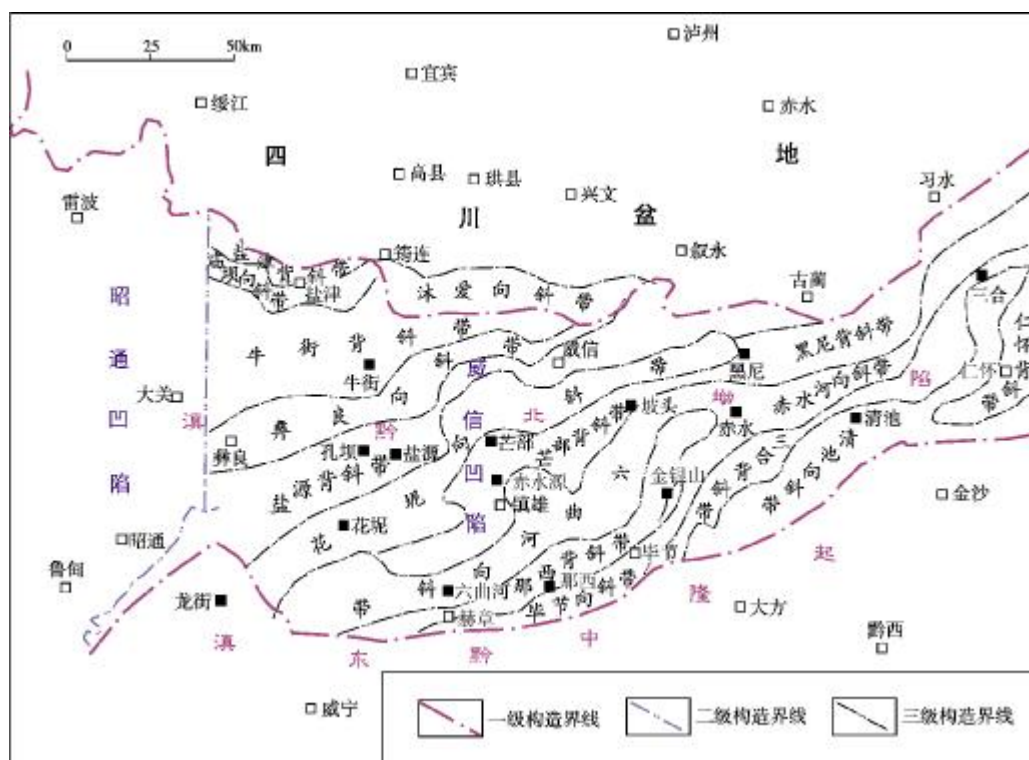


图1 滇黔北研究区构造区划图

滇黔北工区经历了晚元古代晚期—早古生代扬子陆架南部大陆边缘、晚古生代—中三叠世裂陷陆表海、中生代前陆盆地的构造沉积演化历史,发育了层系较齐全、地层厚度大且分布广的海相震旦系—中三叠统和陆相上三叠统—下白垩统两大沉积组合。加里东构造运动晚期的华夏板块碰撞挤压之造山构造运动,使得滇黔北—四川地区的晚志留世—泥盆纪沉积受乐山—龙女寺、小草坝等古隆起控制。早白垩世沉积之后的晚燕山构造运动期,随着扬子东南的雪峰基底拆离造山带和粤海造山带向西北方向的持续冲断和上隆,扬子块体东南部区域发生区域性的陆内造山形变,川东—湘鄂西侏罗山式隔槽隔档褶皱波及本区并形成云贵燕山高原。喜马拉雅构造运动期,随着太平洋—古特提斯洋与扬子板块碰撞、印度洋板块向北俯冲碰撞,形成近东西向和近南北向共同剪切的构造应力格局,云贵燕山高原发生“南强北弱”的持续隆升剥蚀、系列冲断与“西强东弱”的扭动走滑,造就了滇黔北目前的强烈构造改造残留型坳陷,高原地形地貌起伏大,河流切割深,晚期的油气保存条件整体变差。

滇黔北沉积盖层目前表现为强烈的压性构造特征,呈现为典型的“背斜带平缓宽阔、向斜陡峭狭窄”的隔槽式褶皱形变带,构造形变强度处于四川盆地南缘隔档式褶皱形变与黔东南冲断褶皱形变之间。构造走向线以南北向、北东东向和北东向为主,背斜带与向斜带在威信—毕节以东区域呈向西北凸出的弧形,再往北东方向靠拢并在赤水河附近变化为三个背斜带与向斜带相间的格局。由滇东黔中隆起向滇黔北坳陷至四川盆地,构造形变由强到弱,体现了研究区遭受燕山期以来江南—雪峰持续的陆内造山运动、喜马拉雅期印度板块向北冲挤双重作用的影响。

## 2 滇黔北海相页岩与美国商业开发的页岩气层可类比

区域地质调查与钻探成果表明,滇黔北下志留统龙马溪组和下寒武统牛蹄塘组,是海相下古生界黑色页岩富集层(图2),其页岩气主要特征参数与美国五大商业页岩气盆地页岩气层可大致类比(表1)<sup>[4,7-8]</sup>,可作为是滇黔北海相下古生界页岩气勘探评价的近期重点层位。

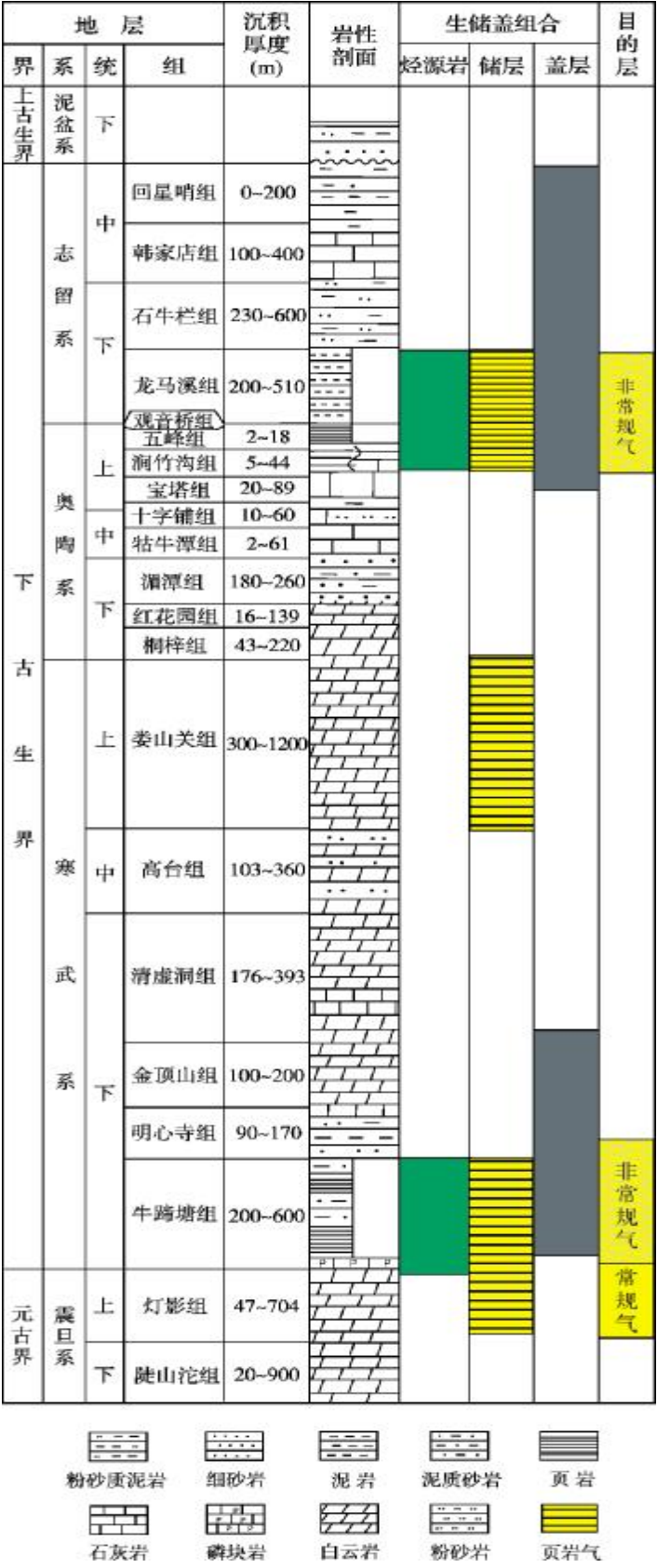


图2 滇黔北下古生界页岩气综合柱状图

表1 滇黔北海相下古生界页岩与美国五大页岩气盆地主要特征对比

页岩气盆地名称	商业开发页岩气层名称	地质时代	埋藏深度 (m)	页岩层厚度 (m)	优质页岩气层厚度 (m)	干酪根类型	TOC (%)	R <sub>o</sub> (%)	总孔隙度 (%)	页岩含气量 (m³/t)	石英含量 (%)	目的层
美国	阿巴拉契亚	D <sub>3</sub>	610~1824	91~610	90~280	II型	0.5~4.7	0.4~3.5	2.0~11	1.70~2.8	29~47	非常规气
	Marcellus组	D <sub>2</sub>	1291~2590	90~275	15~60	II型	5.3~7.8	1.0~4.0	5.5~7.8	1.65~26.5	32~51	
	Antrim组	D <sub>3</sub>	183~730	36~180	21~36	I型为主	0.3~24	0.4~1.1	2.0~10	1.13~2.8	20~40	
	New Albany组	D—C <sub>1</sub>	76~1494	31~140	15~30	II型	1.0~25	0.44~1.50	5.1~15	1.14~2.6	35~52	
	Barnett组	C <sub>1</sub>	1981~2591	61~152	15~60	II型	2.5~13	0.70~3.10	1.0~6.1	8.49~9.9	27~60	
中国	圣胡安	K	914~1829	152~579	60~90	III型为主	0.5~3.0	1.56~1.93	0.5~5.5	0.37~1.3	28~43	非常规气
	龙马溪组	S <sub>1</sub>	1900~2065	135~217	28~43	II型	0.8~4.9	2.84~3.36	0.3~7.9	0.12~5.8	35.4~52.6	
	牛蹄塘组	C <sub>1</sub>	1500~3500	105~375	35~81	II型	0.5~9.4	2.96~3.81	0.8~5.8	0.13~1.9	27.6~49.9	
注:对比结果对比性较好。时代偏老												✓



## 2.1 黑色海相页岩层区域性稳定展布

### 2.1.1 龙马溪组页岩呈北厚南薄变化

本文所称的“龙马溪组”,从地层古生物专业的严格角度来讲,已经包括了下志留统龙马溪组( $S_{1l}$ )以及上奥陶统观音桥组( $O_{3g}$ )、五峰组( $O_{3w}$ ),考虑到上奥陶统的厚度很薄和勘探对象称谓的方便,简单地用“龙马溪组”一词代之。

龙马溪组为一套深灰色至灰黑色粉砂质泥岩、碳质泥页岩、硅质泥页岩夹泥质类砂岩,自上而下颜色加深、砂质减少、有机质含量增高,与上覆的黄葛溪组( $S_{1h}$ )或罗惹坪组( $S_{1z}$ )呈整合接触关系(岩性以浅灰色至灰白色粉砂岩、含钙粉砂岩为主夹灰色粉晶灰岩)。龙马溪组可细分为两个岩性段,上部以深灰至灰黑色泥岩、含钙质泥岩、含钙粉砂质泥岩为主,中、下部以灰黑色和黑色碳质泥岩、页岩为主,夹少量粉砂质泥岩。研究区中北部龙马溪组厚度为190~260m,区域地层厚度总体呈西南向东北增加的趋势,南部受滇东黔南隆起影响而向南逐渐减薄并出现区域性薄灰岩和粉砂岩夹层,颜色变浅(出现灰色和灰绿色),大致呈北东东向在彝良龙街—赫章花坨—镇雄孔坝—赤水源—坡头—毕节金银山一线发生地层剥蚀尖灭。

观音桥组主要为一套深灰色薄层生物碎屑灰岩。生物碎屑以介壳和螺类化石为主,部分保存完

整。观音桥组在区域上均有分布,但厚度很薄(视厚度为0.38~0.92m),可作为志留系与奥陶系的分界标志层。五峰组主要由灰黑至黑色含钙页岩、笔石页岩和深灰色粉砂质泥岩组成,下部夹灰色薄层粉晶灰岩,视厚度6.1~11.9m,与下伏的宝塔组(灰至深灰色粉晶灰岩、泥灰岩)极易区别并呈整合接触关系。

观音桥组和五峰组分布特征同龙马溪组,在研究工区南部边缘出现地层减薄、尖灭和缺失现象。

区域地质调查、钻探和地震勘探成果表明,龙马溪组沉积于华南加里东造山带西北侧的前陆盆地,为华南加里东造山带及其西北边缘的康滇古陆(含乐山—龙女寺隆起和滇东隆起)区域构造格局共同构筑形成闭塞的前陆盆地之陆棚相滞流缺氧沉积环境(图3)<sup>[9]</sup>。在浅水—深水陆棚相带,富含飘浮笔石、富有机质的黑色泥页岩发育<sup>[9-11]</sup>,是页岩气勘探开发的有利岩系。黑色泥页岩页理发育,水平纹层理发育,含碳质较高。页岩层面上普见纵横散布的条状笔石化石,尤其是龙马溪组下部和底部页岩之笔石极为丰富,局部含量高达70%以上,堪称笔石页岩,并见少量的小型直角石,保存较完整。龙马溪组黑色泥页岩厚度在研究区中北部达70~165m(图4),由北向南灰黑色泥页岩厚度也逐渐减薄,显示龙马溪组沉积中心在滇黔北研究区北部,受北侧乐山—龙女寺古隆起和南缘的滇东隆起构造控制沉积作用明显(图3)。

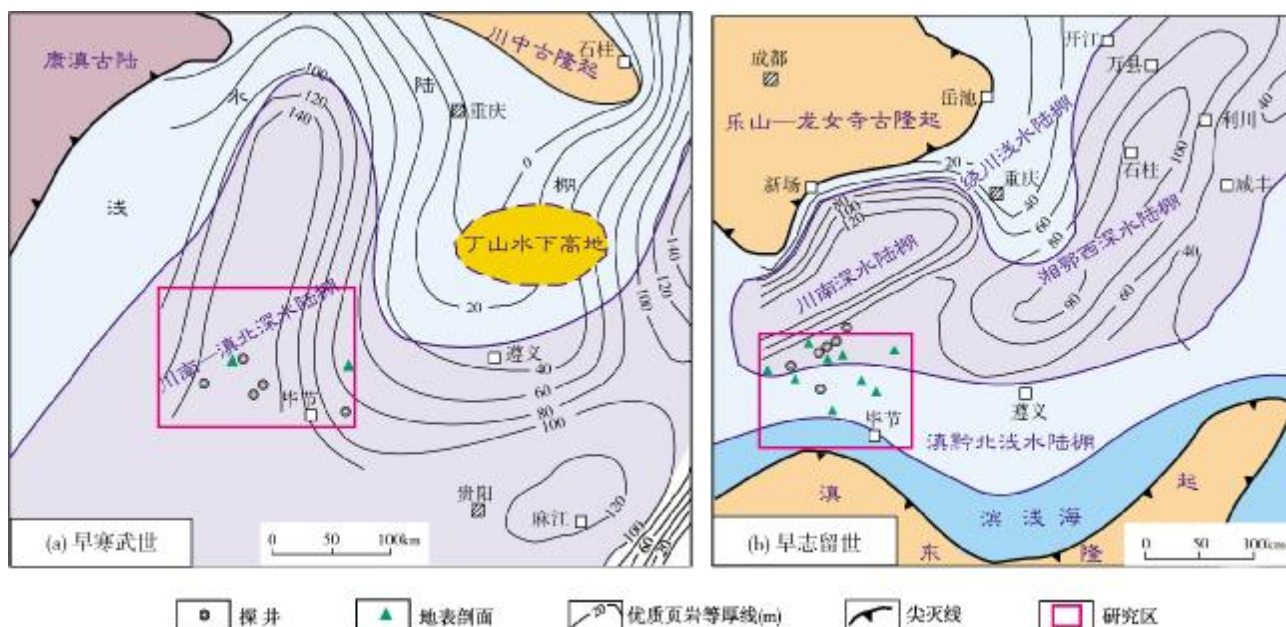


图3 滇黔北研究区及邻区早寒武世和早志留世沉积相展布图

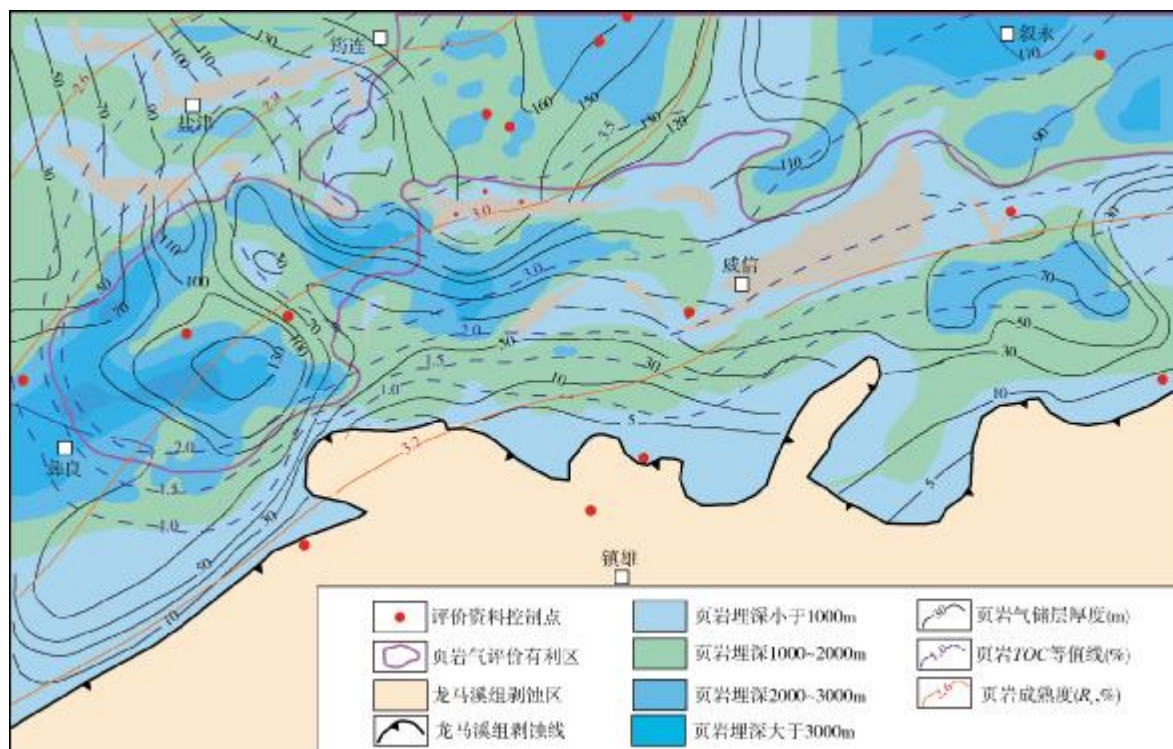


图4 滇黔北研究区下志留统龙马溪组页岩综合评价图

### 2.1.2 牛蹄塘组页岩呈东厚西薄变化

本文所称的下寒武统“牛蹄塘组”(C<sub>1n</sub>),是沿用云南省镇雄地层小区牛蹄塘组的地层涵义,与贵州遵义的牛蹄塘组相同,相当于昆明—晋宁地区的梅树村阶渔户村组之上的筇竹寺组,四川盆地称之为筇竹寺组或九老洞组(下部),岩性组合特征十分相似。牛蹄塘组主要为深灰色、黑色粉砂质泥页岩、碳质页岩和泥质粉砂岩,底部出现一套“硅磷层”(即硅质泥岩、硅质岩和磷块岩及富小壳化石的含硅质泥页岩、含磷质泥页岩)。自上而下,岩层颜色加深、砂质减少、硅质增加、有机质含量增高。牛蹄塘组沉积区域稳定,分布连续,地层厚度大(110~560m),受西侧的康滇古陆的构造控制,自西向东厚度呈增厚趋势,东部的镇雄—大方地区最厚达524~552m。

区域地质调查和勘探成果揭示,滇黔北研究区处于早古生代扬子克拉通盆地(大陆架)的东南缘,随着早寒武纪早期全球快速海侵体系域出现,由快速上升洋流形成的深水陆棚相缺氧沉积环境造就了下寒武统牛蹄塘组富有机质、富硅质、富有色金属元素的黑色泥页岩系<sup>[9]</sup>(图3),黑色页岩总体呈“西薄东厚”的特征(图5)。沉积微相研究表明,牛蹄塘组

下段沉积时水体较深,为缺氧沉积环境下发育的深水陆棚相,深灰色、灰黑色泥页岩较厚,富硅质和碳质,在盐源地区发现一个具有深水浊积特征的粉细砂体;上段水体变浅,为浅水陆棚相沉积,由深灰、灰色泥页岩夹粉砂质泥页岩组成。中下部泥页岩中富含大量的硅质海绵动物、节肢动物、软体动物、刺胞动物、小腕足动物、半索动物及藻类等门类化石,反映了其富含有机质。

## 2.2 页岩沉积建造底部层 TOC 含量最高

区域地面地质调查揭示,滇黔北牛蹄塘组和龙马溪组黑色泥页岩在沉积建造的中下部位最为发育,最为集中,这与早寒武世早期全球快速海浸时期上升洋流带来丰富的营养物质、晚奥陶世末期—早志留世早期强烈的造山作用形成扬子大陆架(台地)南缘前陆盆地(带)快速滞流的沉积环境有关。这一特殊的构造格局与沉积环境,导致研究工区的沉积环境能量低、水体较深而安静、缺氧和富营养、盛产浮游生物,沉积物以粒细、色深、富化石、水平纹层理发育良好为典型特征。

牛蹄塘组和龙马溪组黑色泥页岩区域分布稳定(图4和图5),TOC含量分别为0.55%~9.37%和



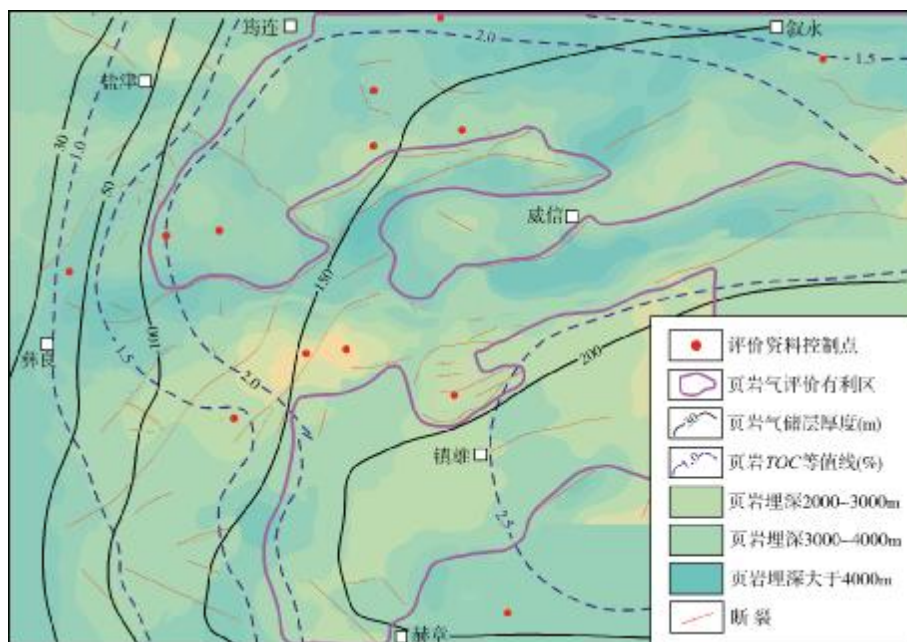


图5 滇黔北研究区下寒武统牛蹄塘组页岩综合评价图

0.61%~15.9%,大多数在2.0%以上,与北美已商业开发页岩的TOC含量大致相当(中等水平),是形成页岩气藏的最有利层段。页岩TOC丰度的变化,具有向页岩沉积建造底部层系逐渐增高的特征。如筠连南YQ1井龙马溪组底部页岩(196.75~219.58 m井段), $\text{TOC} \geq 2\%$ ,最高达3.34%,平均为2.26%,富碳质页岩层连续累计厚度达32m;镇雄北YQ2井牛蹄塘组底部页岩(192.39~281.68m井段), $\text{TOC} > 2\%$ ,最高达9.37%,平均为2.94%,富碳质页岩层连续累计厚度达50m。

### 2.3 海相页岩处于干气阶段的过成熟状态

滇黔北下古生界牛蹄塘组和龙马溪组页岩热演化程度高,镜质组反射率 $R_o$ 达2.0%~4.35%,已处于过成熟演化的干气阶段。平面上,页岩热演化程度具有西北略低、东南略高的区域变化趋势,这与西北部康滇隆起长期相对浅埋藏有关;纵向上,浅层的龙马溪组页岩 $R_o$ 比深层牛蹄塘组的略低(差值约0.3%~0.9%),这与两层系之间存在数百米乃至千余米厚的碳酸盐岩和碎屑岩建造并长期覆盖埋藏压实有关。

全岩X衍射分析等结果表明,YQ1井龙马溪组、YQ2井牛蹄塘组页岩黏土矿物的伊蒙混层矿物间层比为5%~10%, $T_{\max}$ 为484~565℃。页岩气烷烃

类碳同位素分析表明,YQ1井呈现出 $\delta^{13}\text{C}_1 > \delta^{13}\text{C}_2$ 的分布特征, $\delta^{13}\text{C}_2$ 为-36.7‰~-32.2‰, $\delta^{13}\text{C}_1$ 为-33.5‰~-32.5‰, ( $\delta^{13}\text{C}_2 - \delta^{13}\text{C}_1$ )为-3.2‰~-0.3‰,显示出页岩气为与油型气相关的、呈高热过成熟状态的有机成因烃类气。页岩气中 $\text{CO}_2$ 气体碳同位素值分布比较均匀并相对富集轻碳同位素,YQ1井页岩气 $\text{CO}_2$ 的 $\delta^{13}\text{C}$ 为-20.1‰~-17.1‰,YQ2井的 $\delta^{13}\text{C}$ 为-18.8‰~-15.63‰,这说明牛蹄塘组和龙马溪组页岩处于过成熟晚期之干气状态。

### 2.4 页岩岩石结构致密,页理层纹和微裂缝发育

页岩岩心样品分析与岩矿鉴定成果揭示,滇黔北海相牛蹄塘组和龙马溪组页岩岩石结构致密,含气层段岩石密度比其他页岩层略为降低,富页岩气之页岩孔隙较发育。四川筠连南YQ1井龙马溪组和YQ2井牛蹄塘组层位的81个页岩样,岩石密度数值变化不大,平均2.66 t/m<sup>3</sup>左右,其中含气段的页岩层岩石密度略低0.05~0.21 t/m<sup>3</sup>,与美国商业开采的页岩气岩石密度变化规律<sup>[4]</sup>大体一致。

常规性的页岩岩心测试样品成果表明,页岩基质孔隙极不发育,多为微细毛管孔隙,渗透率也远远小于致密砂岩。筠连南YQ1井龙马溪组页岩孔隙度为1.1%~4.9%(平均值2.63%),渗透率为(0.004~0.042)×

$10^{-3} \mu\text{m}^2$  (平均 $0.019 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ) (图6); YQ2井牛蹄塘组页岩孔隙度0.3%~1.3% (平均值0.65%), 渗透率 $(0.007 \sim 0.015) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  (平均值为 $0.012 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ )。

与北美商业开采页岩气盆地的页岩层孔隙度5%~12%、渗透率 $(0.0001 \sim 0.01) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 值相比, YQ1和YQ2井页岩的孔隙度偏小, 渗透率处于中等水平。

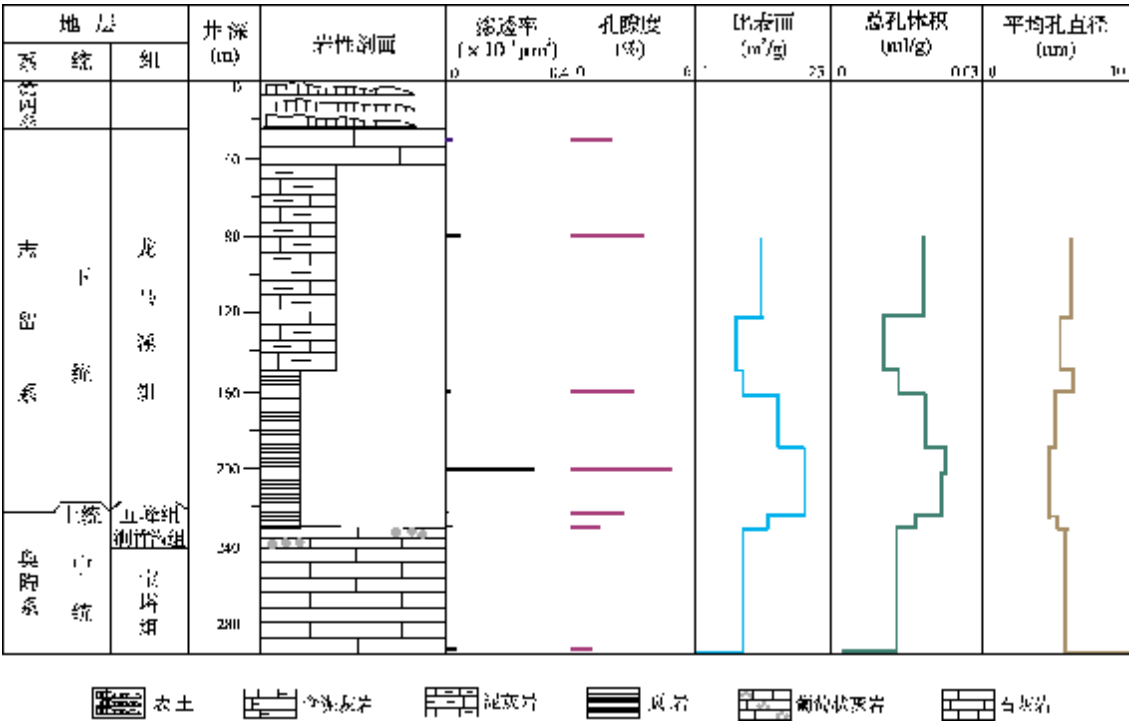


图6 四川筠连南 YQ1 井龙马溪组页岩储层岩心测试结果

地面露头剖面和钻井岩心观察显示,牛蹄塘组和龙马溪组页岩的页理纹层、高角度缝和微裂缝普遍发育,裂缝类型主要为构造缝及缝合线。YQ1井岩心每米见裂缝1~14条不等,宽度 $5 \sim 15 \mu\text{m}$ ,充填物磨圆度为次棱—次圆状,胶结类型为孔隙式胶结,线形颗粒接触关系;YQ2井构造缝宽度 $30 \sim 75 \mu\text{m} (\pm 10 \mu\text{m})$ ,略低于美国沃斯堡盆地Barnett页岩发育的 $50 \mu\text{m}$ 宽裂缝。滇黔北研究区页岩在总体致密背景下仍具备较好的储集条件,YQ1井龙马溪组底部52m厚的页岩层孔渗条件和含气性相对较好,近期在筠连沐爱地区完钻的2口深度在2000m左右的页岩气评价井,其龙马溪组页岩层孔隙度达到5%~9%以上。

世界页岩气资源丰富,但未得到广泛开发,究其原因,一个重要因素便是页岩岩石结构致密。对页岩气而言,页岩纹理、微裂缝、微孔隙是页岩气的主要储集空间,裂缝是页岩气从基质孔隙流出的主要途径,页岩气藏开发主要靠压裂人工裂缝网以沟通页岩基质孔隙和天然微裂缝,这需要靠大型体积压裂产生的人工裂缝系统来采出吸附气<sup>[4,7,12]</sup>。页岩气受

孔渗条件制约,往往只有裂缝系统发育的页岩才具备长期的商业开采价值。因此,页岩的脆性和硬度参数,对页岩气储层实施体积压裂改造能否形成有效缝网就显得十分重要。滇黔北研究区龙马溪组和牛蹄塘组页岩黏土矿物组成较复杂,脆性矿物总量较高,其石英含量占23%~38%,石英+长石总含量的平均值大于56%(最高达65%以上),这些石英和长石矿物多呈黏土粒级,常以纹层形式出现。方解石和白云石含量多在10%~25%,高者可达38%(图7)。反映这些页岩之砂质和钙质含量较重,硬度大,脆性较强。脆性矿物的高含量预示了龙马溪组和牛蹄塘组页岩容易在外力作用下形成天然裂缝和诱导缝,但黏土含量达23%~42%,则又表现出一定的塑性特色。总之,页岩的裂缝系统发育程度可提升其开采价值,岩石的矿物成分是控制其裂缝发育的内在主要因素,因此,低泊松比、高杨氏弹性模量、富含石英、脆性大的页岩是实现体积压裂缝网的首选对象,具有较高渗透能力和利于进行压裂改造的裂缝发育带是页岩气藏勘探目标的重点区域。

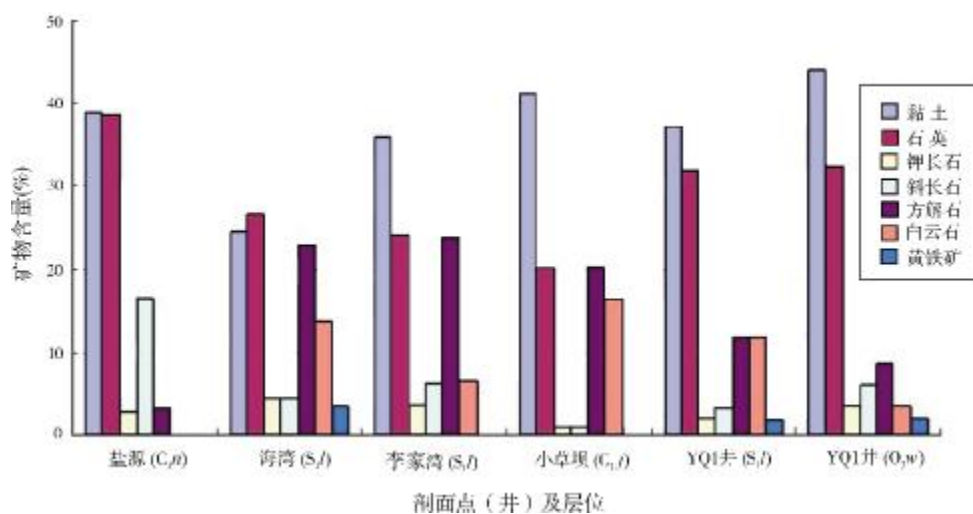


图7 滇黔北研究区海相页岩全岩分析矿物组成含量对比图

### 3 高热演化的海相页岩气藏评价要高度重视保存条件

国外的研究表明,页岩气主要以吸附、游离状态赋存在页岩有机质、黏土颗粒表面或基质孔隙、天然微裂缝中<sup>[1,6]</sup>,页岩气藏是以富有机质的页岩为储集层的分布连续型气藏<sup>[2,4,7,12-13]</sup>,它属于大规模滞留在气源岩之中、基本没有经过运移和聚集过程的特殊性气藏。也就是说,页岩气藏是集气源岩层、储气层、盖层于页岩自身的“自生自储型”岩性气藏,它具有含气面积大、不受构造因素控制、没有明显气水分界线等气藏特征<sup>[4,7]</sup>。因此,页岩气藏的赋存机理兼具煤层吸附气和常规天然气藏特征,表现出复杂多机理递变特点<sup>[4,7,12]</sup>。北美页岩气勘探开采实践表明,页岩气气藏富集的关键因素是页岩厚度、有机质含量和页岩气储层空间(孔隙和裂缝)三大因素,总的赋存规律是页岩层厚度愈大,有机碳含量愈高,页岩孔隙和微裂缝愈发育,页岩气藏的富集程度就愈高,资源丰度也就愈大<sup>[4,6-8]</sup>。

#### 3.1 保存条件影响过成熟演化阶段的页岩含气性

类比研究表明,滇黔北研究区的沉积埋藏—热演化史与美国已商业开发页岩气的福特沃斯盆地南部区域<sup>[4,7]</sup>类似,均明显经历了埋藏→抬升→再埋藏→再大规模抬升剥蚀的演化过程。两者都有明显的二次生烃过程,页岩层未完全进入裂解气阶段就大规模抬

升。但是,两者在目前的盆地构造形态特征和页岩层有机质热演化程度两个方面有很大的差异。

资料调研表明,北美商业页岩气盆地目前表现出较完整的原型盆地,构造拗陷形态简单,构造形变弱,页岩层热演化程度适中(以成熟—高成熟演化阶段为主),还多处于不间断供气、连续聚集成藏状态,属于连续油藏类型<sup>[10,12-13]</sup>,页岩气藏易于保存。北美页岩气的这种状况形成,显然与其面积巨大的北美地台(克拉通板块)刚性基底稳固、构造形变强度相对较弱、页岩层有机质热演化程度普遍不高(大多还没有达到或出现过超深埋的过成熟演化状态)有关,这也许是北美页岩气勘探评价的有关文献中很少提及“保存条件”的主要原因。

与北美地台相比,滇黔北研究区所在的扬子构造域仅是一个微小的“准地台”,刚性块体面积小,地史上的多期次构造运动、强烈的陆内造山运动是其重要的构造特色,因而滇黔北研究区的地质构造要复杂得多。滇黔北拗陷是一个呈现隔槽式强烈形变的构造拗陷,它没有完整的、宽广的向斜型盆地背景,海相页岩有机质热演化程度极高,已处于过成熟晚期状态( $R_o \geq 2\%$ ),目前已经没有不间断供气、连续聚集成藏的地质条件。尤其是滇黔北研究区晚燕山期以来持续的挤压冲断与构造隆升、喜马拉雅期强烈的走滑改造活动,已成为改造残留型构造拗陷,页岩气的保存条件已显得十分重要。

在芒部、盐源、牛街等背斜带上的地质浅井和页岩气深井,钻探成果无一例外地表明,海相页岩均处



于过成熟阶段,其页岩气的含量、甲烷的纯度与盖层封盖条件的好坏、破坏断层的影响有密切相关性。盖层条件差或受通天断层破坏的地区,页岩气的含气量和甲烷的纯度明显降低,甚至出现氮气等非烃气体,说明在高温演化的页岩气藏,务必认真考虑并高度重视天然气保存条件评价。

### 3.2 页岩含气性随保存条件变好和 TOC 增大而增强

滇黔北多口地质浅井页岩密闭岩心解吸实验表明,页岩析出气泡和上涌现象随着埋藏深度的增加而更加明显,解吸出的含气量增加,甲烷的含量随之增加,表明页岩含气性随保存条件变好而增强(图7)。而且,随着浸泡水的温度升高,岩心解吸气量增加,解吸速度加快。页岩的甲烷吸附量随TOC而增加,证实了富有机质的页岩较贫有机质的页岩具有更多的微孔隙空间,吸附的天然气的量更多。资料分析认为,这与页岩具有很大的比面积有关,如筠连南YQ1井龙马溪组底部页岩比面积在 $8.69\sim 20.36\text{ m}^2/\text{g}$ 之间(平均值为 $13.89\text{ m}^2/\text{g}$ )(图6),吸附气量远大于相邻的龙马溪组上部泥岩及下伏的宝塔组(O<sub>2b</sub>)石灰岩,后者的平均孔直径相对较大,岩石比面积较小(宝塔组石灰岩仅为 $0.487\text{ m}^2/\text{g}$ )。化验成果表明,YQ1井页岩吸附气饱和度介于 $96.74\%\sim 105.64\%$ 之间(平均值为 $99.33\%$ )。吸附气饱和度亦随埋深的增大而增加,为近饱和—过饱和,相关性较大,表明页岩有利于吸附气的解吸。

页岩含气性,随TOC丰度增大而明显变好。YQ1井龙马溪组下部80余米厚的页岩层中,底部灰黑色泥页岩出芯时明显见到页岩气泡,岩心热水浸泡析出天然气泡,气体上涌现象明显,汇集的天然气可点燃,蓝色火焰高达30 cm左右,甲烷含量为 $73.12\%\sim 88.32\%$ 。这段含气页岩层连续厚度达52 m,现场分析TOC达 $2.12\%\sim 3.14\%$ ,是龙马溪组泥页岩段中TOC值最高的。对222.34~225.83 m井段采集三个页岩气岩心样,在现场进行6 h解析测试,游离气最高含气量为 $0.429\text{ m}^3/\text{t}$ 。这些含气的页岩层在伽马测井(GR)中表现为高伽马值段,其数值达100~500 API甚至更高(平均值在230 API以上的高阻页岩即具有较高的页岩气产量)。

页岩岩心含气量实验结果表明,筠连南YQ1井和YQ2井含气量分别为 $0.08\sim 0.42\text{ m}^3/\text{t}$ 和 $0.01\sim 0.58\text{ m}^3/\text{t}$ ,平

均值为 $0.21\text{ m}^3/\text{t}$ 和 $0.14\text{ m}^3/\text{t}$ ,同美国五大页岩气盆地含气量相对比,YQ1井含气量的测试值明显偏低,这主要是由于该井揭示的页岩层埋深较浅、保存条件较差所致。从中也可以看到,页岩层在如此浅的埋藏深度(200 m左右)就有甲烷气存在,那么随着页岩层埋藏深度的增加和整体封闭保存条件的变好,页岩气藏的含气性可能会明显变好,CH<sub>4</sub>纯度也可能会增高,这充分显示了滇黔北页岩气的勘探潜力。

分析化验数据和地质综合分析表明,区域盖层剥蚀、通天断层、大气淡水冲刷等破坏条件,将严重影响页岩的含气性。随着滇黔北区域保存条件变好,优质页岩层厚度愈大,TOC含量愈高,页岩孔隙和微裂缝愈发育,页岩气藏赋存状况就会变得越好,海相下古生界页岩的含气性也会变好且含气量会明显增加,资源丰度也会愈来愈高。因此,针对页岩有机质处于过成熟演化阶段的改造残留型构造坳陷,影响页岩气藏赋存的关键因素是区域保存条件和页岩厚度、TOC含量以及页岩气储层空间。

滇黔北页岩气勘探评价实践经验表明,选择页岩气勘探区带和部署评价井位时要避开通天断层的破坏带,避免区域盖层破坏和地表水冲洗淋漓破坏区,选择有浅层整体承压水文地质环境之宽阔构造区带。

## 4 改造残留型构造坳陷海相页岩气勘探综合选区

最近十年来,美国页岩气产量呈现出指数级增长态势,2010年首次取代俄罗斯跻身于全球天然气产量第一位。从我国页岩气的实际发展情况看,涉及页岩气科技信息的系统跟踪和地质调查研究仅仅四五年时间,而真正开展勘探实际工作则不足四年,目前国内已有几口页岩气探井获得页岩气流的突破,但总体看来,中国页岩气还处于刚刚起步阶段<sup>[6-8,12]</sup>。凭作者从事三年多滇黔北页岩气勘探评价实践活动后的直觉,面对中国南方地区活动多变的大地构造格局与沉积背景、特殊的海相高演化地质条件和复杂的地形地貌条件,决定了中国南方海相页岩气发展不可复制“北美模式”,而需要冷静睿智地绘制页岩气发展蓝图,务实地走中国南方海相特色的页岩气勘探开发之路。

### 4.1 高演化海相页岩气综合选区的选取原则

北美页岩气选区评价,主要由页岩层厚度、埋藏

深度、有机质含量、有机质热演化程度、页岩含气性、页岩矿物成分、页岩力学性质、储集层物性等八个要素来体现<sup>[2-4,14]</sup>。结合滇黔北改造残留型构造拗陷研究区页岩气地质条件,针对海相古生界构造改造强烈、页岩有机质过成熟、高热演化状态的特殊性,在南方海相古生界构造拗陷区进行页岩气勘探区带优选时,务必认真考量页岩气的保存条件,高度重视特殊的自然地貌、地理交通和水源供给条件。

为了更准确地优选有利勘探区带,落实页岩气的勘探“甜点”,本文以三年多的页岩气勘探评价实践认知为基础,慎重提出如下“定性定量”相结合的六个原则条件,可作为南方高演化海相页岩气地质勘探综合选区选取标准的考虑因素:

(1)区域构造相对简单,地层产状较平缓,灰黑色泥页岩发育层位稳定,横向无突变,区域广布,单层厚度在30~50m以上;

(2)灰黑色泥页岩有机质丰度高,  $\text{TOC} \geq 2.0\%$ ;

(3)页岩层理和微裂隙发育,岩石脆性好,有一定的基质孔隙度;

(4)要有上覆碎屑岩盖层,存在盖层封闭保存条件,避开通天断层(断层的横向影响范围估计要大于断层的切割深度),页岩含气性好( $\geq 0.40 \text{ m}^3/\text{t}$ );

(5)页岩层埋藏深度适中,普遍处于1 000~4 000 m之间,以宽阔的大中型向斜和宽缓的构造斜坡地带为优;

(6)地形起伏相对较小,道路交通条件较好,有较便利的水源供给条件,远离人口稠密的城镇,地震勘探和钻探工程实施相对便利。

## 4.2 勘探评价综合选区结果

鉴于滇黔北研究区西部地形起伏大和交通条件较差的实际,根据上述区带优选原则,综合评价后认为,研究区中北部的彝良—筠连—叙永区域是龙马溪组和牛蹄塘组页岩气目的层叠合的有利勘探区带,南部的赫章—镇雄区域为牛蹄塘组页岩气目的层的有利勘探区带(图4和图5)。

彝良—筠连—叙永区域 以彝良、沐爱宽广向斜构造带和牛街、黑尼宽广背斜构造带为主。构造形变相对简单,地层展布相对稳定,有二叠系、三叠系或泥盆系、石炭系区域盖层,通天断层少,具有一定的保存条件。具有稳定展布的龙马溪组+牛蹄塘组两套页岩气目的层(厚度分别为70~160m和100~

185m),页岩气层埋藏深度多为1 800~3 700m,钻探已发现龙马溪组页岩气流。该区域属于丘陵地貌,交通便利,加上靠近四川盆地常规天然气生产基地,技术保障相对便利。龙马溪组和牛蹄塘组的页岩气有利勘探面积分别约为4 200  $\text{km}^2$ 和3 900  $\text{km}^2$ 。

赫章—镇雄区域 以六曲河、花尼宽广向斜构造带为主,勘探回旋余地大。下奥陶统一上寒武统盖层保存较好,大部区域还有二叠系和三叠系盖层,地层产状平缓(倾角 $<18^\circ$ )。牛蹄塘组页岩层区域稳定(厚150~230m),页岩气层埋藏深度多为1 200~2 800m。主要为云贵高原平坝地带和低小丘陵地貌,县道乡村公路正大规模建设,交通运输和供给逐渐便利。牛蹄塘组页岩气有利勘探面积大约为4 800  $\text{km}^2$ 。

## 5 结论与建议

滇黔北研究区下古生界海相页岩发育,页岩厚度、埋深、TOC、含气性、力学性质、物性和矿物成分等评价参数,与北美已商业开发页岩气田具有一定的相似性。针对龙马溪组目的层实施的第一口探井,页岩层压裂已突破页岩气流关,表明滇黔北页岩气资源前景广阔,是我国南方海相页岩气勘探开发的有利地区之一。若能在已有三年页岩气勘探评价实践基础的滇黔北地区开展页岩气先导试验区建设,则在广阔的中国南方海相页岩气领域具有相当的代表性和示范引领作用。

(1)滇黔北研究区下志留统龙马溪组与下寒武统牛蹄塘组黑色泥页岩,具有发育层位稳定、单层和累计厚度大、有机质丰度高、成熟度高的特点和中低孔、低渗、富硅质的特征,优质的页岩气储层单层厚度达50m以上,资源前景可观。

(2)滇黔北海相下古生界页岩的含气性随保存条件变好和TOC丰度增大而增加,通天断层、区域盖层剥蚀、大气淡水冲刷等破坏条件严重影响到其含气性。影响页岩气藏赋存的关键因素是保存条件和页岩厚度、TOC含量、页岩气储层空间。页岩气赋存的基本规律是保存条件越好,优质页岩层厚度愈大,TOC含量愈高,页岩页理层纹、微孔隙和微裂缝愈发育,则页岩气藏赋存状况越好,资源丰度愈高。

(3)针对滇黔北属于改造残留型构造拗陷,下古生界海相页岩有机质热演化程度高,晚期构造活动影响强,提出页岩气有利勘探区带综合评价优选需要重点考虑定性与定量相结合的六个原则条件,保

存条件应成为页岩气勘探综合选区的重要因素。综合优选出彝良—筠连—叙永区域为龙马溪组和牛蹄塘组页岩气目的层叠合的有利勘探区带,赫章—镇雄区域为牛蹄塘组页岩气目的层的有利勘探区带。

(4)面对页岩气美好的发展前景和机遇,面对勘探开发核心技术和效益开发的挑战,滇黔北页岩气勘探评价还需要潜心地精细研究,需要不懈地努力攻关。只有摸清针对改造残留型构造拗陷高演化海相页岩气藏赋存规律,并建立起页岩气综合勘探评价理论,形成快速高效的钻井工程技术、有效的页岩气油层保护钻探技术和体积压裂改造、排液采气等核心工艺技术,实现页岩气开发市场化、规模化、工厂化生产的低成本革命,才有可能早日迎来规模效益开发页岩气的产业大发展之春,有效地为缓解国家能源供求矛盾、改善能源结构和增强能源供给安全保障作出贡献。

#### 参考文献

- [1] 张金川,聂海宽,徐波,等. 四川盆地页岩气成藏地质条件[J]. 天然气工业,2008,28(2):152-156.
- [2] 李登华,李建忠,王社教,等. 页岩气形成条件分析[J]. 天然气工业,2009,29(5):22-26.
- [3] 蒲泊伶,蒋有录,王毅,等. 四川盆地志留统龙马溪组页岩气成藏条件及有利地区分析[J]. 石油学报,2010,31(2):225-230.
- [4] Curtis J B. Fractured shale-gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002,86(11):1921-1938.
- [5] 王世谦,陈更生,董大忠. 四川盆地地下古生界页岩气藏形成条件与勘探前景[J]. 天然气工业,2009,29(5):51-58.
- [6] 陈更生,董大忠,王世谦,等. 页岩气藏形成机理与富集规律初探[J]. 天然气工业,2009,29(5):17-21.
- [7] 《页岩气地质与勘探开发实践丛书》编委会. 中国页岩气地质研究进展[M]. 北京:石油工业出版社,2011.
- [8] 张金川,姜生玲,唐玄,等. 我国页岩气富集类型及资源特点[J]. 天然气工业,2009,29(12):109-114.
- [9] 姜月华,岳文浙,业治铮. 华南下古生界缺氧事件与黑色页岩及有关矿产[J]. 有色金属矿产与勘查,1994,3(5):272-278.
- [10] 陈旭. 论笔石带的深度分带[J]. 古生物学报,1990,29(5):507-519.
- [11] 张爱云,伍大茂,郭丽娜,等. 海相黑色页岩建造地球化学与成矿意义[M]. 北京:科学出版社,1987.
- [12] 邹才能,张光亚,陶士振,等. 全球油气勘探领域地质特征、重大发现及非常规石油地质[J]. 石油勘探与开发,2010,37(2):129-145.
- [13] 邹才能,陶士振,袁选俊,等. “连续型”油气藏及其在全球的重要性:成藏、分布与评价[J]. 石油勘探与开发,2009,36(6):669-682.
- [14] 范明,秦建中,张渠,等. 松潘阿坝地区烃源岩有机质热演化特征[J]. 沉积学报,2006,24(3):442-445.

编辑:赵国宪

## Evaluation of Preservation Conditions of Lower Paleozoic Marine Shale Gas Reservoirs in the Northern Part of Dianqianbei Depression

Liang Xing, Ye Xi, Zhang Jiehui, Shu Honglin, Lou Jisheng,  
Yao Qiuchang, Wang Gaocheng

**Abstract:** Dianqianbei Depression is a reformed residual region. Based on the results of regional geological survey and drills in the gas-bearing shale zones in the northern part of it, it is shown that the excellent marine black shale is more than 50m thick in net thickness respectively in lower Silurian Longmaxi and lower Cambrian Niutitang Formations. The shale evaluation factors for both formations in this area, including the shale thickness, buried depth, gas content, mineral composition, organic geochemical indices, mechanical and physical properties, etc., are rather similar in correlation with those in the commercial shale gas fields in America. It means that these shale formations are favorable for hydrocarbon accumulation and can be the prospecting targets. Effected by late intense tectonic activities, the lower Paleozoic marine shale would be seriously influenced by some adverse factors such as heavy fracturing, regional cap-rock erosion and atmospheric freshwater leaching but the gas concentration in the shale would increase with increasing TOC content and well-getting preservation. It is suggested that as integrated evaluation and selection of plays for exploration, six "qualitative and quantitative principles" (QQP) should be taken into account. The preservation condition should be the key one of factors. It is proposed that the plays for exploration targets are the Longmaxi and Niutitang gas-bearing shale in Yiliang-Junlian-Xuyong area, and Niutitang gas-bearing shale in Hezhang-Zhenxiong area.

**Key words:** Lower Paleozoic; Marine formation; Shale gas; Shale reservoir; Preservation condition of reservoir; Reservoir Evaluation; Play choose; Dianqianbei Depression

Liang Xing: male, Senior Geologist. Add: PetroChina Zhejiang Oilfield Company, Liuxia, Hangzhou, Zhejiang 310023, China