

涪陵页岩气田的发现及其特征

中国石化勘探南方分公司

二〇一五年四月



提 纲

- 一、涪陵页岩气田发现
- 二、涪陵页岩气田特征
- 三、勘探理论与技术进展

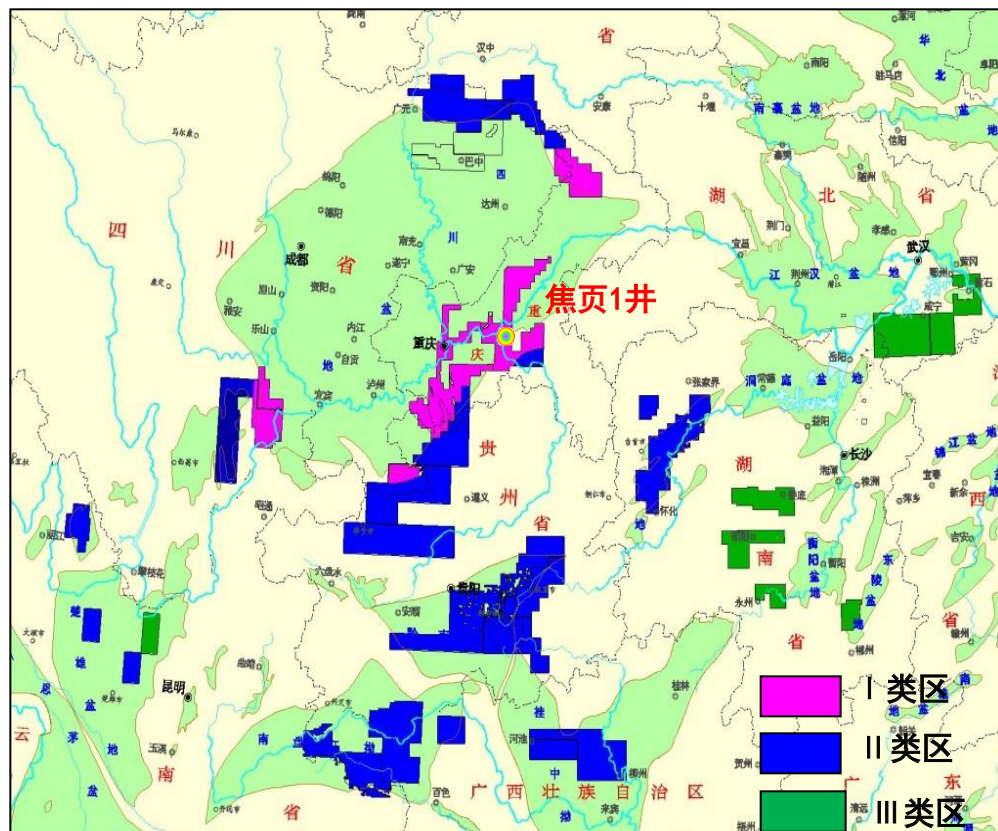
(一) 概况

中国石化勘探分公司从2009年开始，系统全面开展南方海相页岩气基础研究和勘探实践。

南方探区页岩气勘探区块评价表

盆地	区带	目标	层系	地质资源量 (10 ⁸ m ³)
四川盆地	川东南	焦石坝	志留系	7148.81
		丁山	志留系	1883.28
		林滩场	志留系	1177.96
		南天湖	志留系	1012.37
		仁怀	志留系	3318.20
	川西南	五指山-美姑	志留系	13495.11
	川东北	镇巴南	志留系	3163.94
			寒武系	3291.72
四川盆地周缘	川东南	南江	寒武系	3343.02
		武隆	志留系	1563.71
		綦江南	志留系	2230.76
外围	桂中	河池	泥盆系、石炭系	3245.54
		环江	泥盆系、石炭系	9309.28
	雪峰隆起	雪峰5-沅麻	寒武系	6249.00
	南盘江	西林	二叠系	6532.95
		册亨	二叠系	4988.68
		向阳	二叠系	1048.64
	黔南坳陷	龙里	寒武系	2378.16
		凯里	寒武系	1809.82
		黄平	寒武系	4425.33
	鄂东南	鄂东南	寒武系	3650.03
	湘中	涟源	二叠系、石炭系	588.48
		邵阳	二叠系、石炭系	798.35
		永耒	二叠系、石炭系	1500.95

南方探区页岩气勘探区块评价图



1、开展了大量基础性研究工作

◆野外实测地质剖面：62条

◆观察描述岩心：496.53m

◆开展有机地化、物性、含气性、力学性质、地应力、岩矿、微量元素、常量元素、气组分等多方面的分析测试：11157项次

◆解释二维地震：6561.62Km

2010-2012年勘探南方分公司页岩气主要科研项目统计表

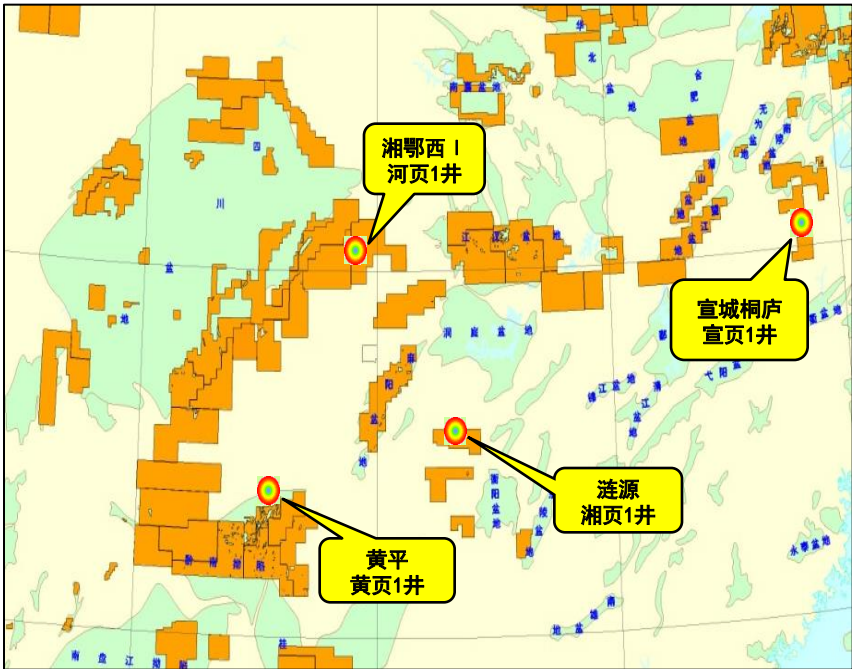
项目来源	项目名称	研究时间
国土资源部	《上扬子及滇黔桂区页岩气资源调查评价与选区》	2010-2013
中石化油田部先导项目	《勘探南方探区页岩气选区及目标评价》	2010-2011
中石化油田部先导项目	《中国石化勘探南方分公司探区页岩油气资源评价及选区研究》	2011-2012

2、分析了前期页岩气勘探效果不理想的原因

中石化兄弟单位先后部署实施了安徽宣城桐庐宣页1、湘鄂西河页1、黔东南黄平黄页1、湘中涟源湘页1井等页岩气专探井，均仅获低产页岩气流或未见页岩气显示。

分析页岩气勘探效果不理想的主要原因是对中国南方海相页岩气与北美页岩气的差异性认识不够。

前期页岩气探井部署图

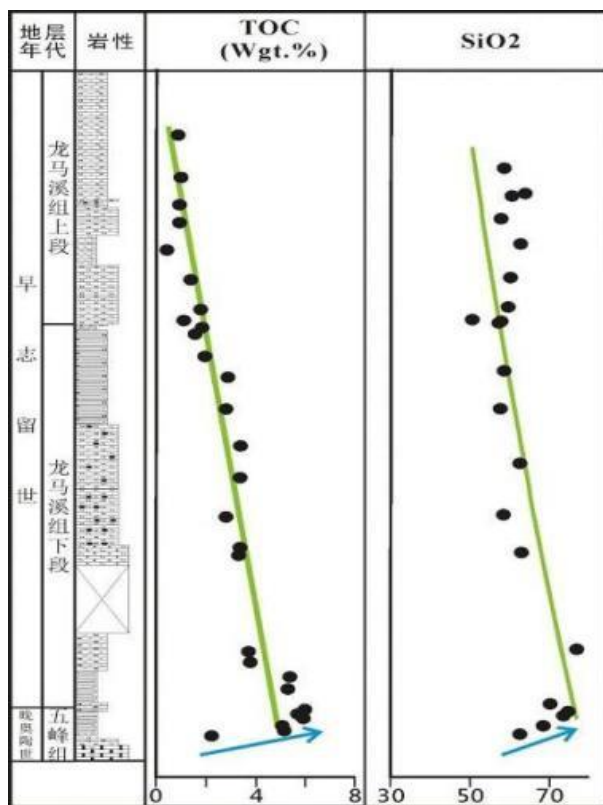


前期页岩气探井试气情况

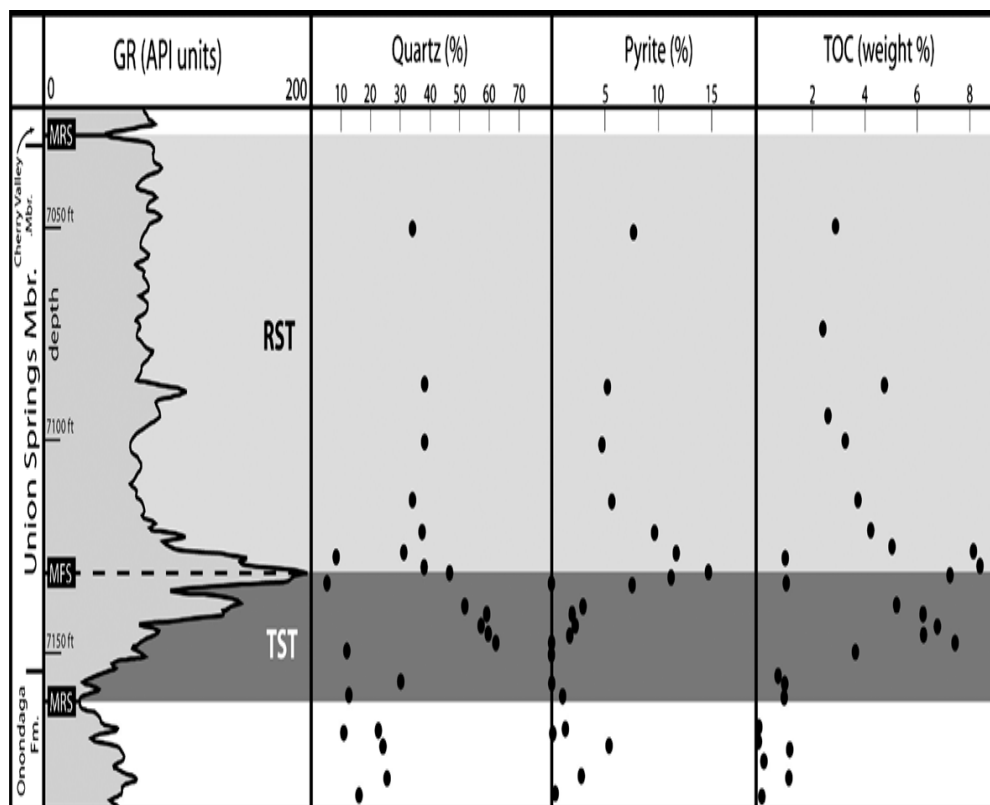
区块	井名	地层	目的层	井深 (m)	测试结果
宣城-桐庐	宣页1	下寒武统	荷塘组	2848	未测试
湘鄂西 I	河页1	下志留统	龙马溪组	2208	见页岩气显示， 压裂后未见气流
黄平	黄页1	下寒武统	九门冲组	2488	压后最高日产 418方
涟源	湘页1	上二叠统	大隆组	2068	压后最高日产 2409方

3、剖析了南方探区海相页岩气与北美页岩气的相似性与差异性

相似性：都属于海相；都富含有机质，同时脆性矿物含量高、处于高成熟—过成熟阶段。



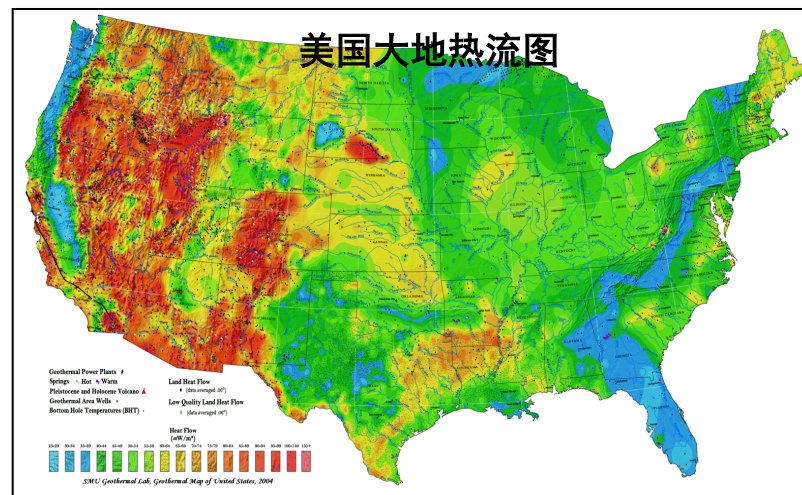
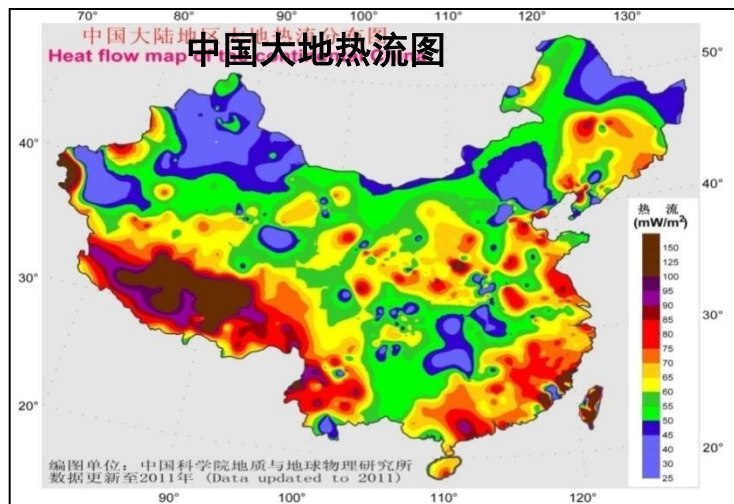
四川盆地东南缘习水骑龙村下志留统剖面



Appalachian Basin Marcellus页岩

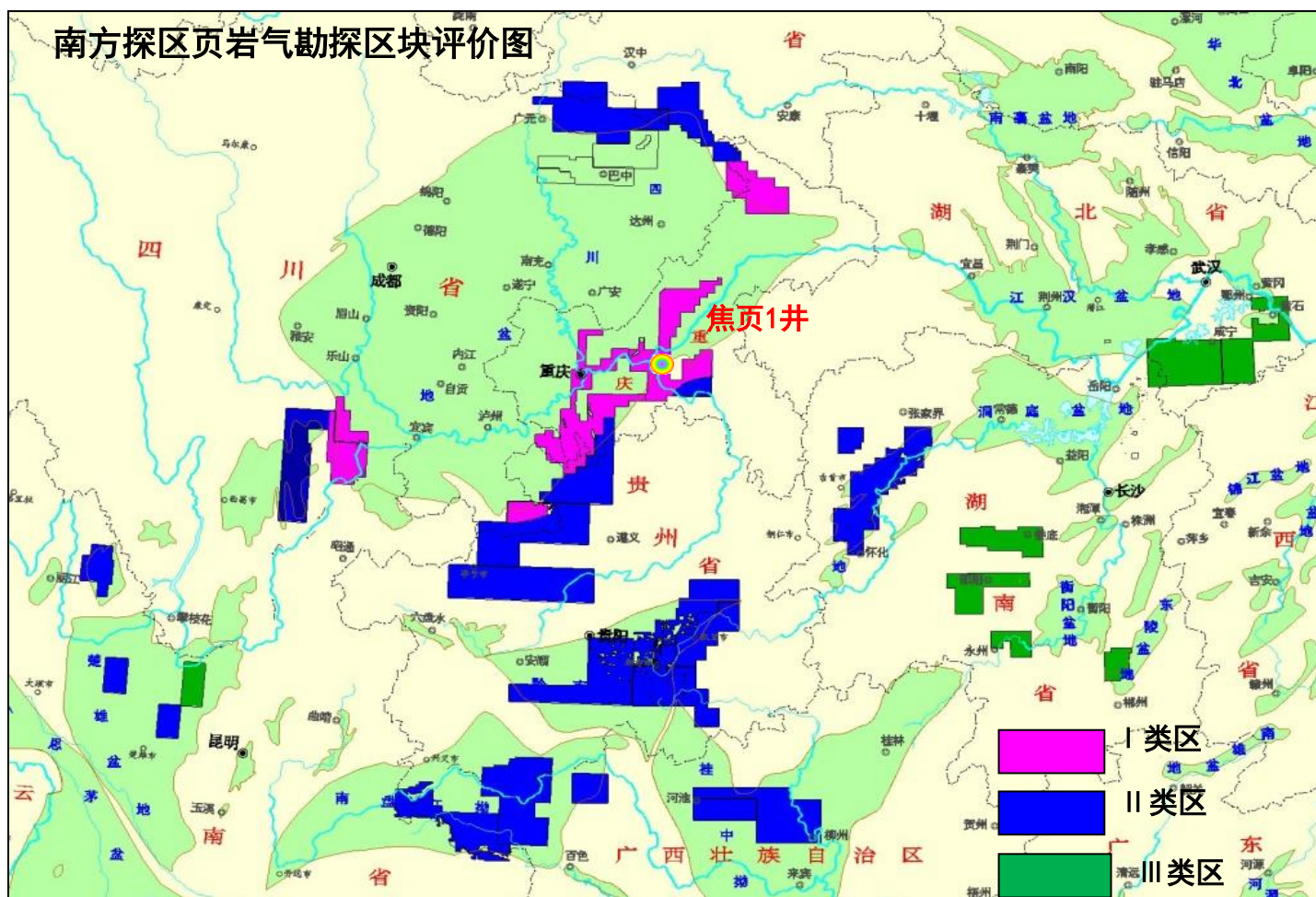
差异性：中国稳定地块小，活动性强，经历多期构造运动叠加改造，页岩气保存条件复杂。

认识到了“有页岩，不一定有页岩气；有页岩气，不一定具有商业开发价值”。



4、提出了勘探思路、优选了有利目标

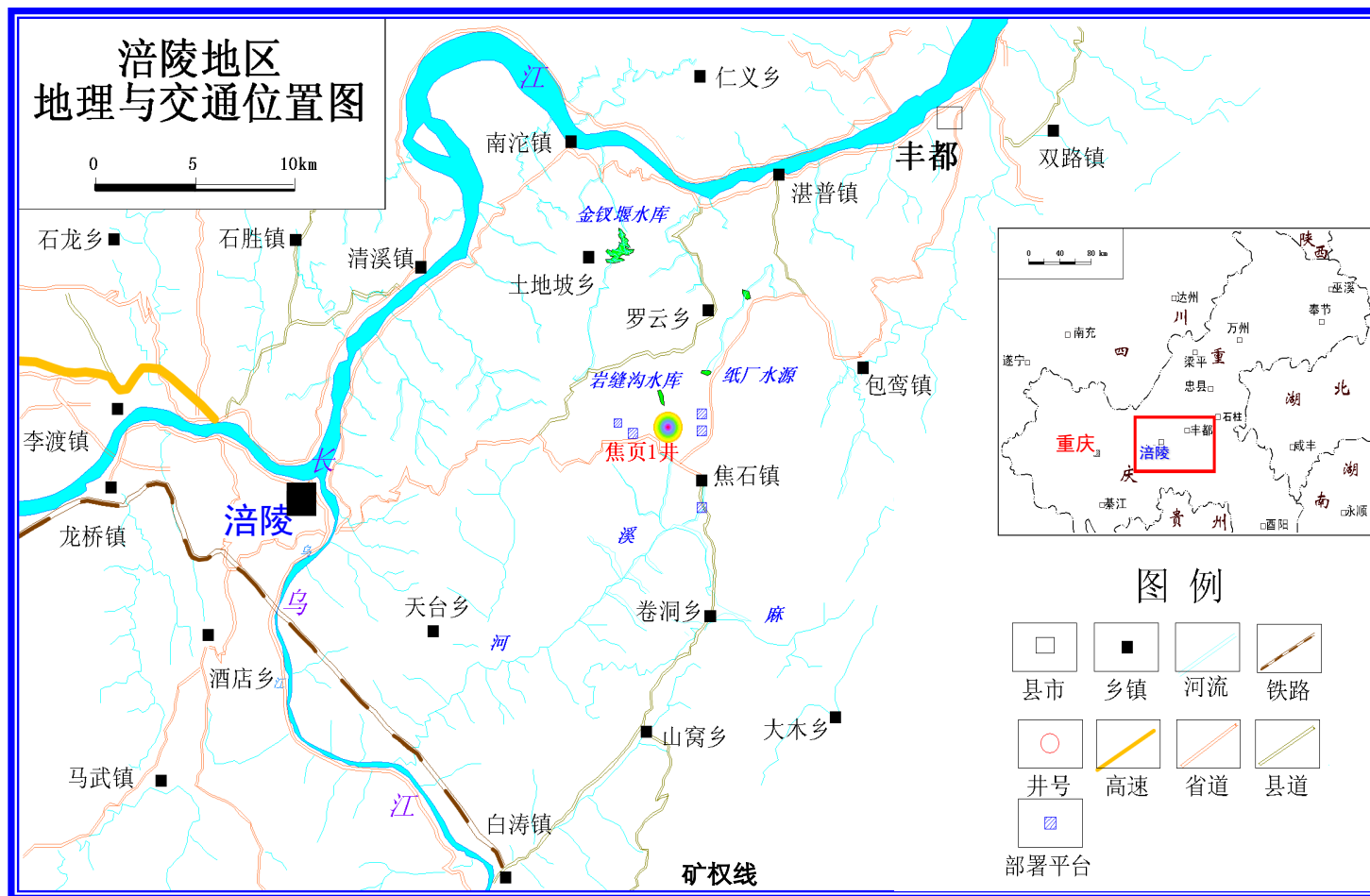
通过扎实的基础研究工作和地质理论创新，明确了南方海相页岩气富集主控因素，提出了南方海相页岩气富集理论，形成了页岩气选区评价体系与标准；通过整体评价，确立了“立足盆内、突破周缘、准备外围”三个层次的勘探思路，优选川东南探区为有利勘探区带，焦石坝为有利勘探目标，部署实施焦页1井，发现了涪陵页岩气田。



(二) 涪陵页岩气田发现历程

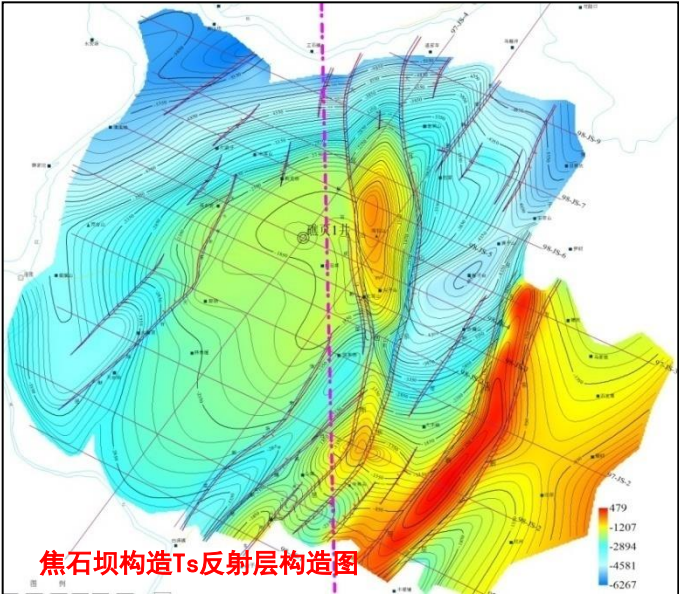
涪陵页岩气田地处重庆市涪陵区境内，北临长江，南跨乌江。

涪陵页岩气田的发现经历了三个阶段。



第一阶段：常规天然气勘探（1950～2009年）

开展石油普查和地质详查，实施二维地震
共14条417.51km，发现和落实焦石坝构造。

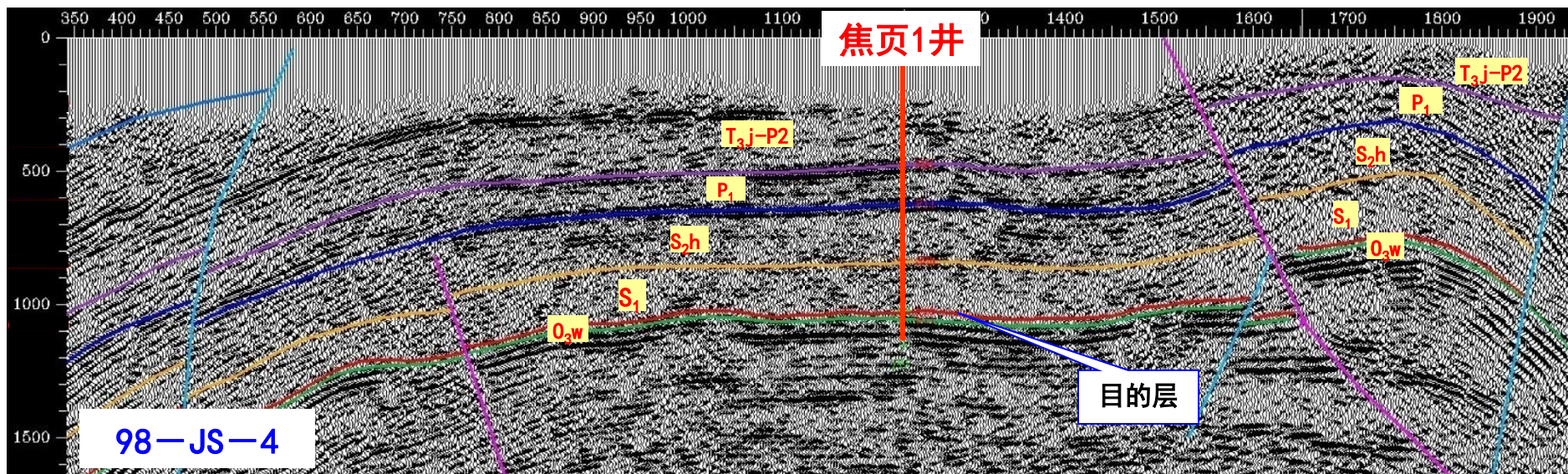
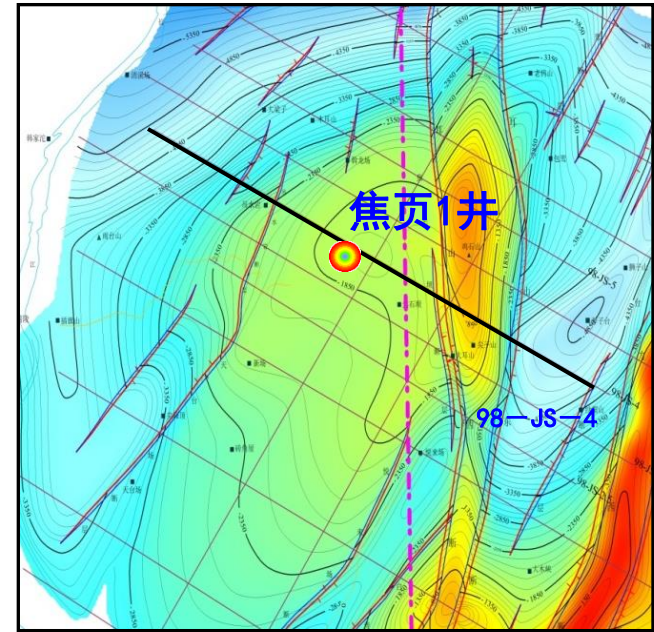


涪陵焦石坝地区勘探工作量简表

勘探项目	施工时间	工作量		施工单位
地震	1997年	97-焦1～4共4条152. 63km	共14条 417. 51km	江汉物探处 四川地调处
	1998年	98-焦1～9、2. 5共10条264. 88km		
MT (1： 50000)	1997年	4条测线， 95个点， 152. 7km		国家地震局
EMAP	1998年	16条测线， 2417物理点， 470. 658km		物探局五处
地面地质详查 (1： 50000)	1997年	23条测线1400km		江汉研究院 四川研究院
综合油气 剖面丈量	1998年	4条剖面， 总厚度4603. 41m		四川研究院 江汉石油学院

第二阶段：页岩气勘探突破阶段（2009～2012年）

2012年，利用二维地震开展综合解释与目标评价，部署**焦页1井**。该井是分公司针对海相页岩气部署的第一口探井。



焦页1井

开钻时间：2012年2月14日

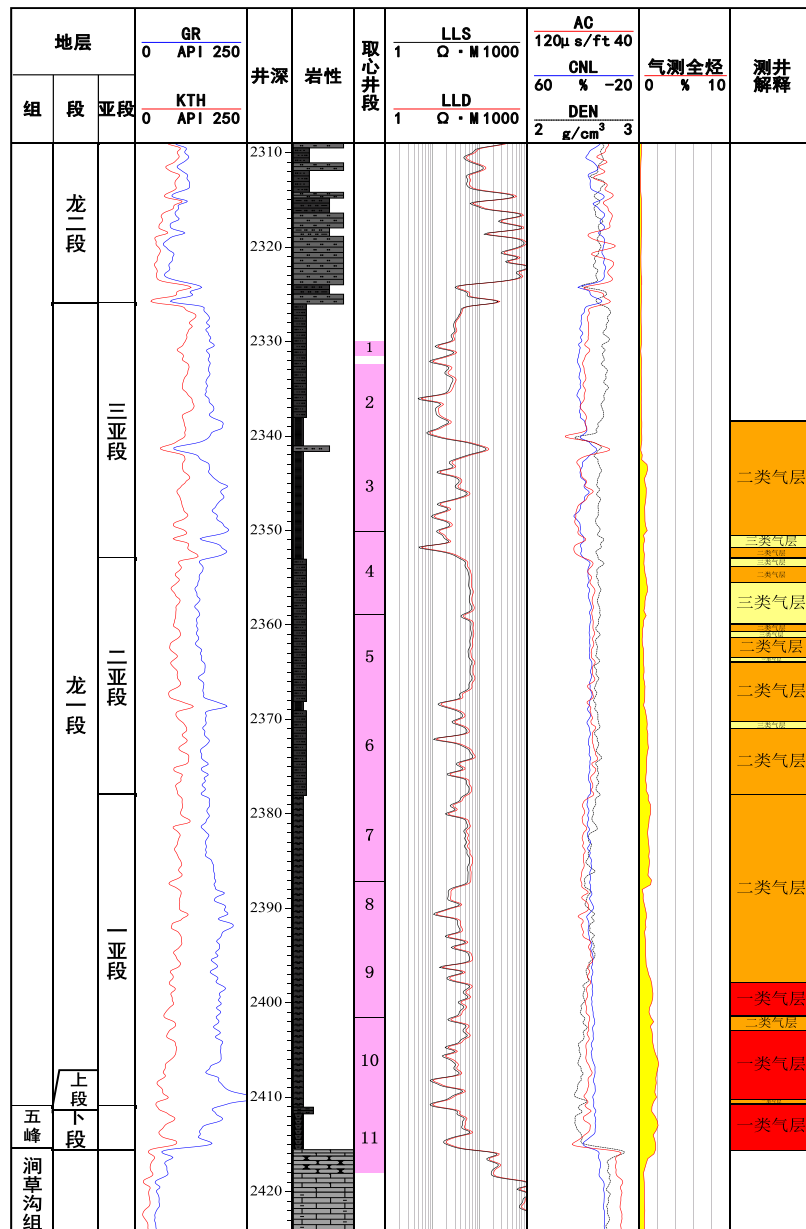
完钻时间：2012年5月18日

完钻井深： 2450m

完钻层位：古生界中奥陶统十字铺组

导眼井系统取心、分析测试及测录井工作，在五峰组-龙马溪组解释页岩气层89m，其中优质页岩气层38m。

焦页1井五峰组-龙马溪组一段综合柱状图



页岩层段具有良好的含气性





为评价落实页岩气产能，
迅速开展侧钻水平井（焦页
1HF井）钻探。

焦页1HF井基本情况

开钻时间：2012年6月19日

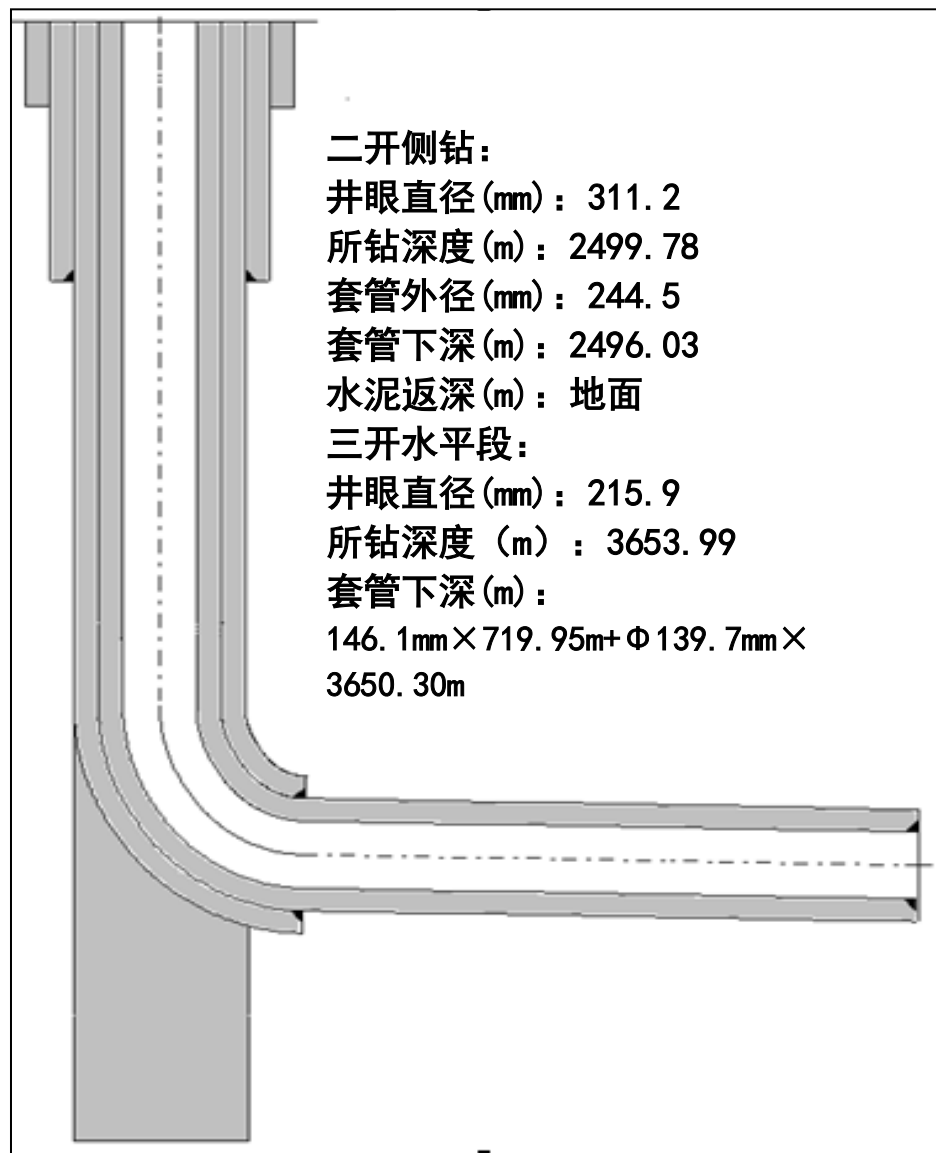
完钻时间：2012年9月16日

完钻井深：3653.99m、

水平段长：1007.9m

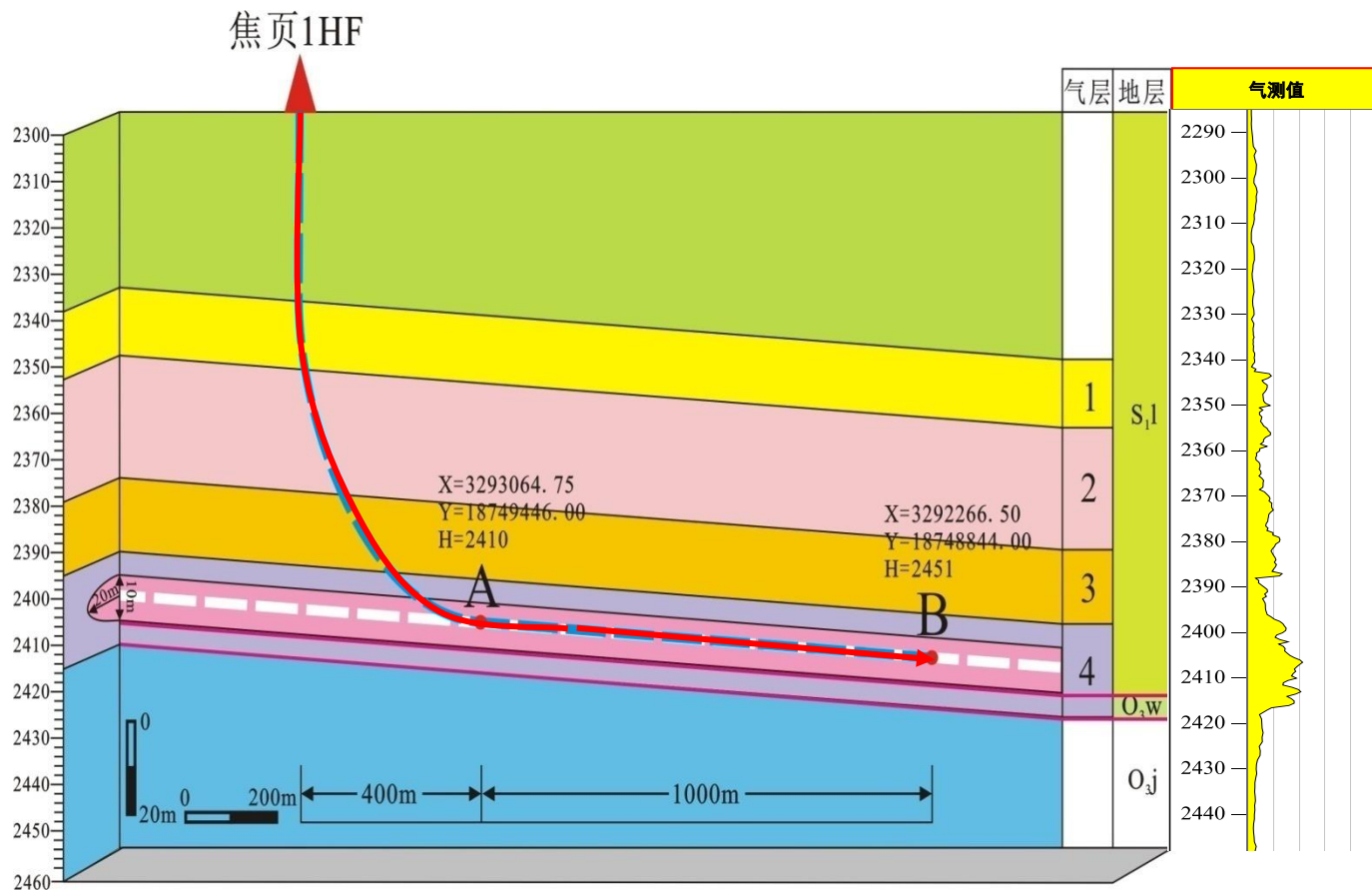
完井方式：套管固井完井

焦页1HF井井身结构示意图



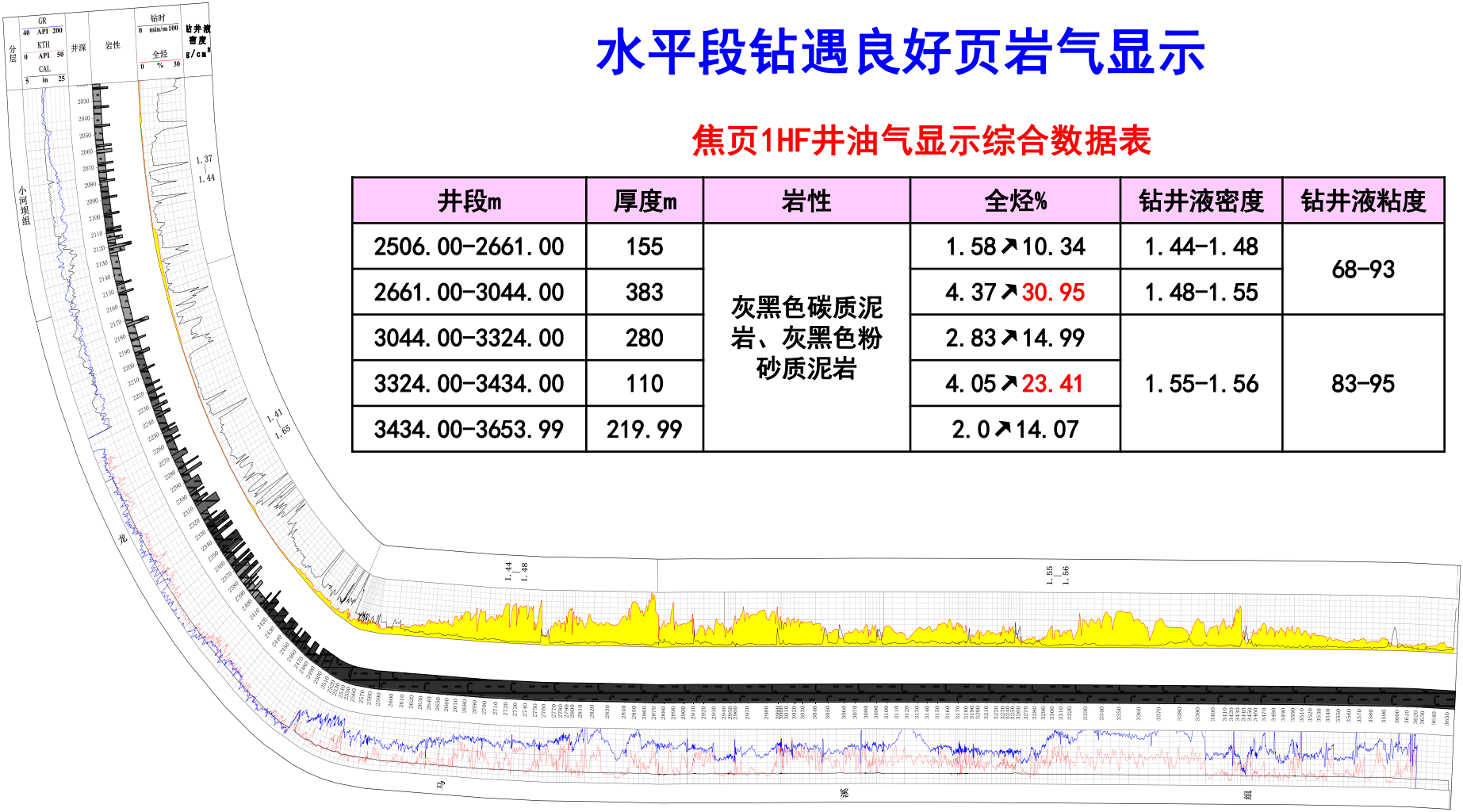
加强随钻跟踪研究，水平段在优质页岩中钻进

在未上LWD，二维地震剖面距离井眼430m的条件下，依靠岩屑、气测和地震标定，完成了水平井地质导向工作，水平段在厚20m的最优质含气页岩层中一次完成，井眼轨迹圆滑。



焦页1HF井实钻井眼轨迹图

焦页1HF井



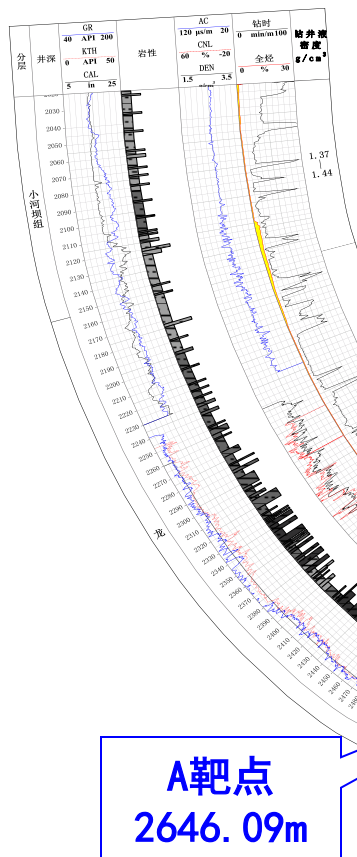
水平段钻遇良好页岩气显示

焦页1HF井油气显示综合数据表

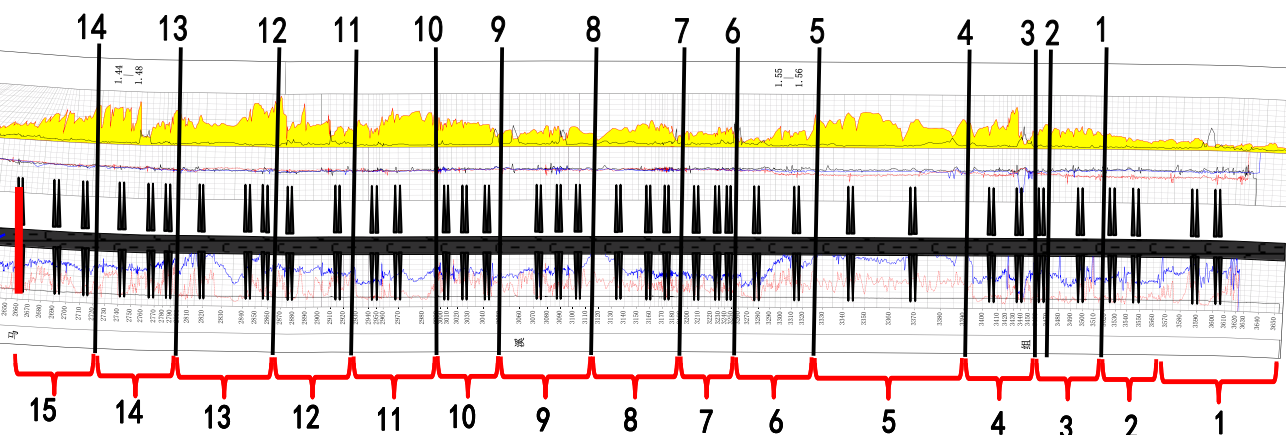
井段m	厚度m	岩性	全烃%	钻井液密度	钻井液粘度
2506.00-2661.00	155	灰黑色碳质泥岩、灰黑色粉砂质泥岩	1.58↗10.34	1.44-1.48	68-93
2661.00-3044.00	383		4.37↗30.95	1.48-1.55	
3044.00-3324.00	280		2.83↗14.99	1.55-1.56	83-95
3324.00-3434.00	110		4.05↗23.41		
3434.00-3653.99	219.99		2.0↗14.07		

压裂情况：2012年10月17日-11月24日，对焦页1HF井水平段2646-3654m分15段进行大型水力压裂。

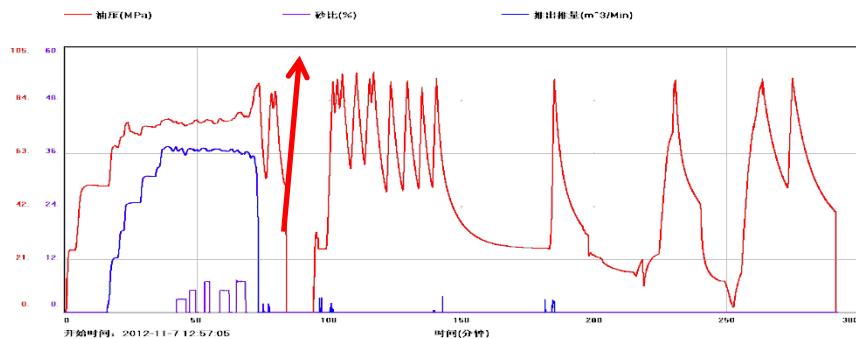
焦页1HF井



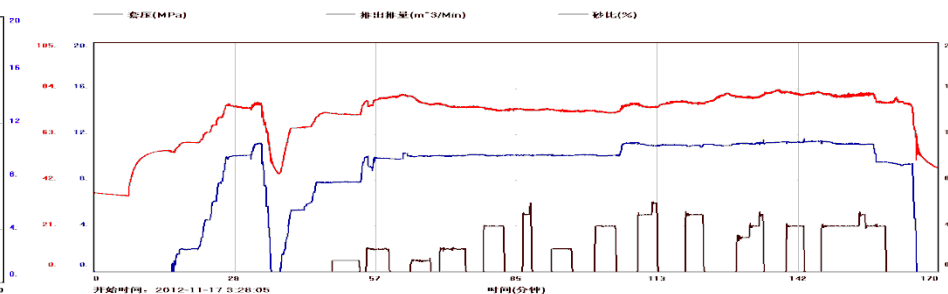
- 施工排量8-12m³/min
- 施工压力40-90MPa
- 累计注入液量19972m³
- 砂量969m³
- 平均砂比12%



□ 前三段加砂困难，施工压力高(达70-80MPa)，地层滤失性强、裂缝缝宽窄、造缝困难。

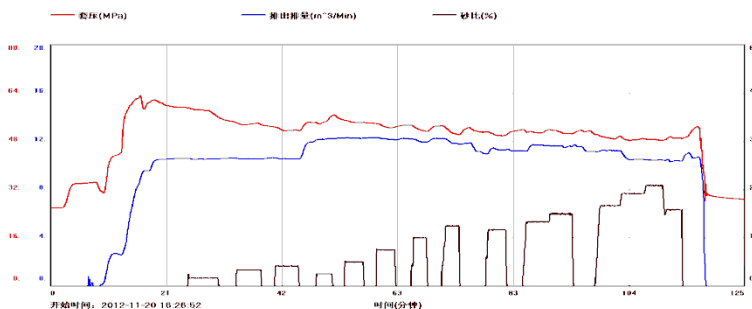


•第一段压裂：5%的40/70目覆膜砂进入地层后，压力快速上升，加砂困难，显示缝宽极小。停泵后，地层内压力下降极快，显示裂缝极其发育的特征。

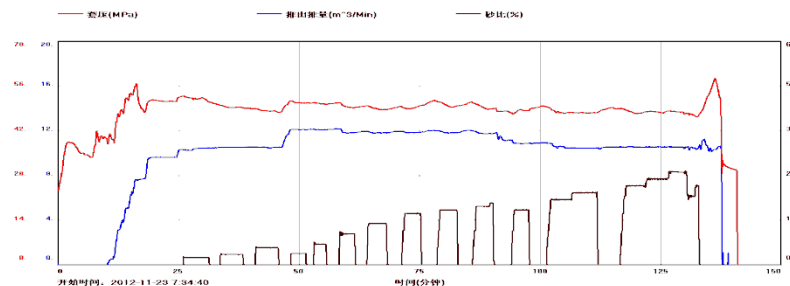


•第二、三段压裂：当用6%的40/70目覆膜砂尝试进入地层后，压力缓慢上升且不下降，地层加砂困难，显示缝宽极小，停泵后，地层内压力下降极快，裂缝非常发育。

□ 通过采取前置酸降低近井摩阻、不断优化泵注程序及调整压裂液性能等有效措施，一般施工压力50MPa左右，加砂基本正常，最高砂比达27%。



•第十段加砂量正常，施工过程泵压逐渐降低。



•第十三段加砂量113.3 m³ (182.67t) 创下了中石化单层（段）加砂量最高纪录

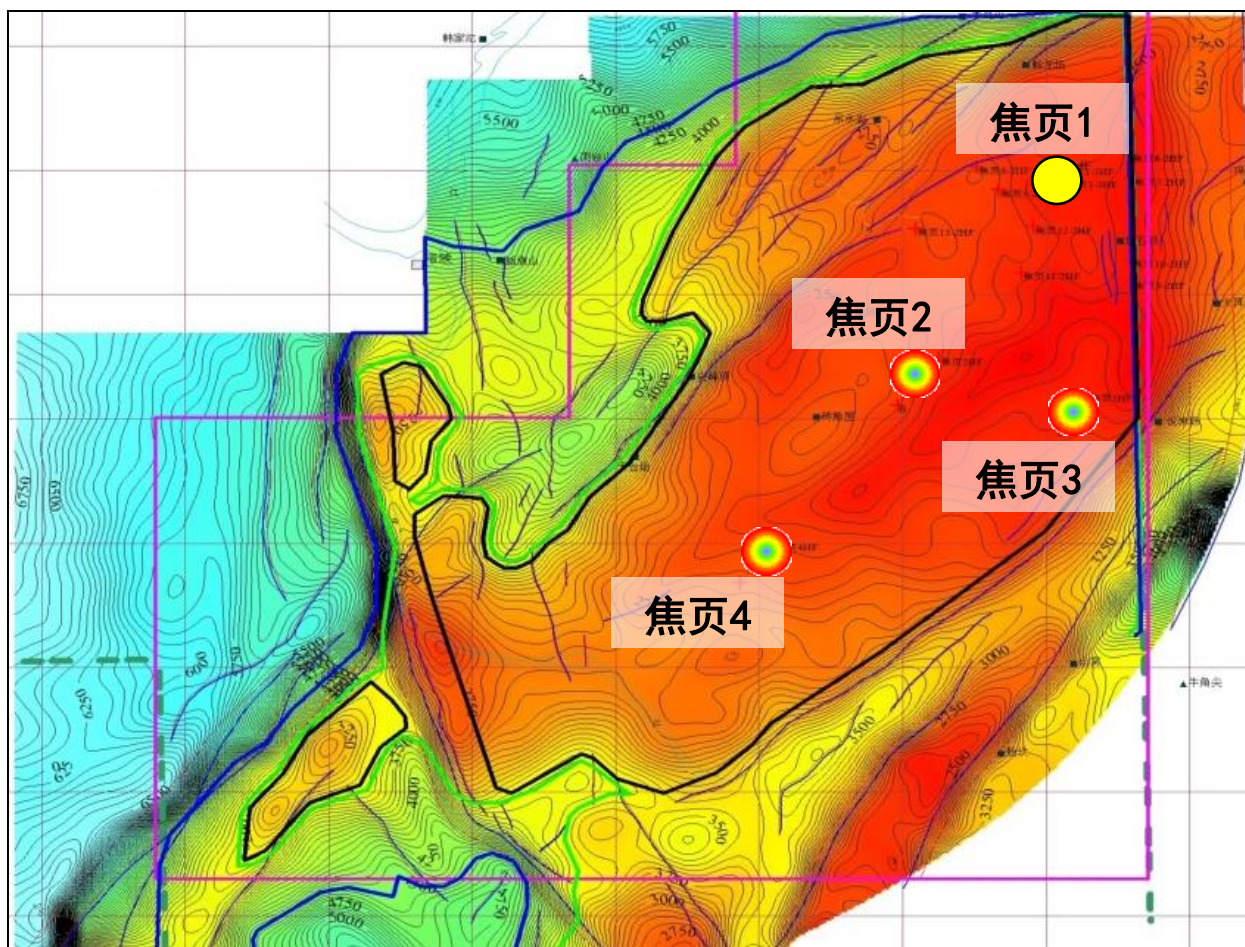
测试情况：2012年11月28日，测试获日产
20.3万方工业气流，发现了涪陵页岩气田。完
成8个制度测试，产量、套压稳定。



序号	工作制度	时 间	井口压力 (MPa)	天然气日产量 ($\times 10^4 \text{m}^3$)
1	14mm油嘴 \times 32mm孔板	11月28日17:15-22:31	6.8	20.3
2	10mm油嘴 \times 32mm孔板	11月28日22:45-29日8:31	9.2	13.6
3	8mm油嘴 \times 32mm孔板	11月29日8:40-30日0:23	10.7	12.4
4	11mm油嘴 \times 32mm孔板	11月30日11:30-12月1日23:30	8.2	14
5	4mm油嘴 \times 36mm孔板	12月2日8:07-2日19:25	21.37	10.81
6	6mm油嘴 \times 36mm孔板	12月2日20:00-3日8:00	16.48	14.22
7	9mm油嘴 \times 36mm孔板	12月3日10:00-4日10:30	10.1	17.4
8	4mm油嘴 \times 36mm孔板	12月4日18:00-12月10日08:00	24.6-25.3	10.4-11.5

第三阶段：页岩气展开勘探（2013~2014年）

焦页1HF井获得商业发现后，迅速展开勘探焦石坝主体，同时部署探井3口、三维地震595K m^2 。焦页2、3、4井压裂测试分别获日产34、12、26万方页岩气流，实现了焦石坝主体控制，控制面积286K m^2 。

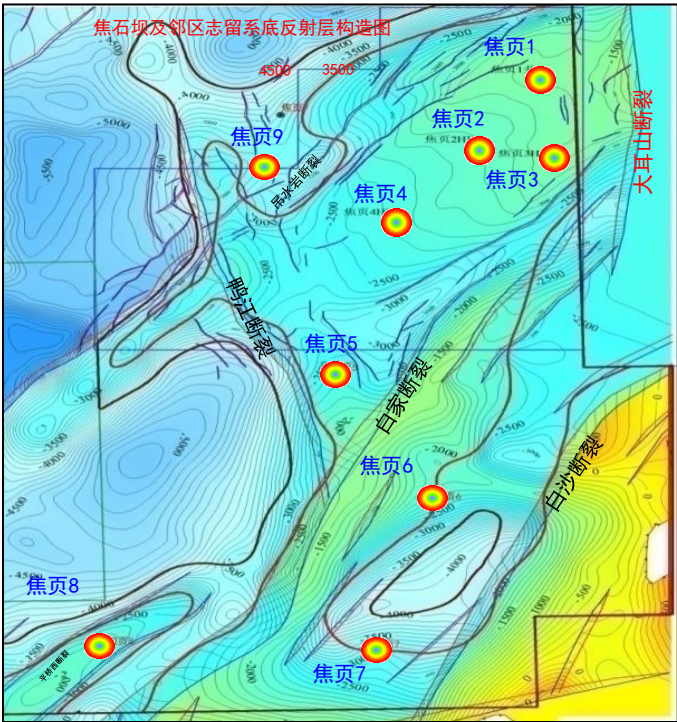


焦石坝外围见良好页岩气显示

外围构造复杂。针对不同构造样式钻探的焦页5、6、7、8井见良好页岩气显示，正在进行水平井钻探。含气面积有望进一步扩大。

焦页1、5、6、7、8井优质页岩气层评价参数对比表

井 号	录井综合解释			ECS测井综合解释			
	厚度 (m)	全烃最大值 (%)	含气量 (m ³ /t)	TOC (%)	有效孔隙度 (%)	脆性矿物含量 (%)	含气量 (m ³ /t)
焦页1井	37.80	2.13	5.85	3.5	4.9	67.4	6.7
焦页5井	43.00	13.01	3.56	2.8	3.5	69.7	4.7
焦页6井	33.40	1.21	4.98	3.0	3.7	72.7	5.5
焦页7井	46.70	2.46	3.77	2.7	3.3	71.7	4.4
焦页8井	33.58	2.04	3.88	2.4	3.0	65.2	3.9



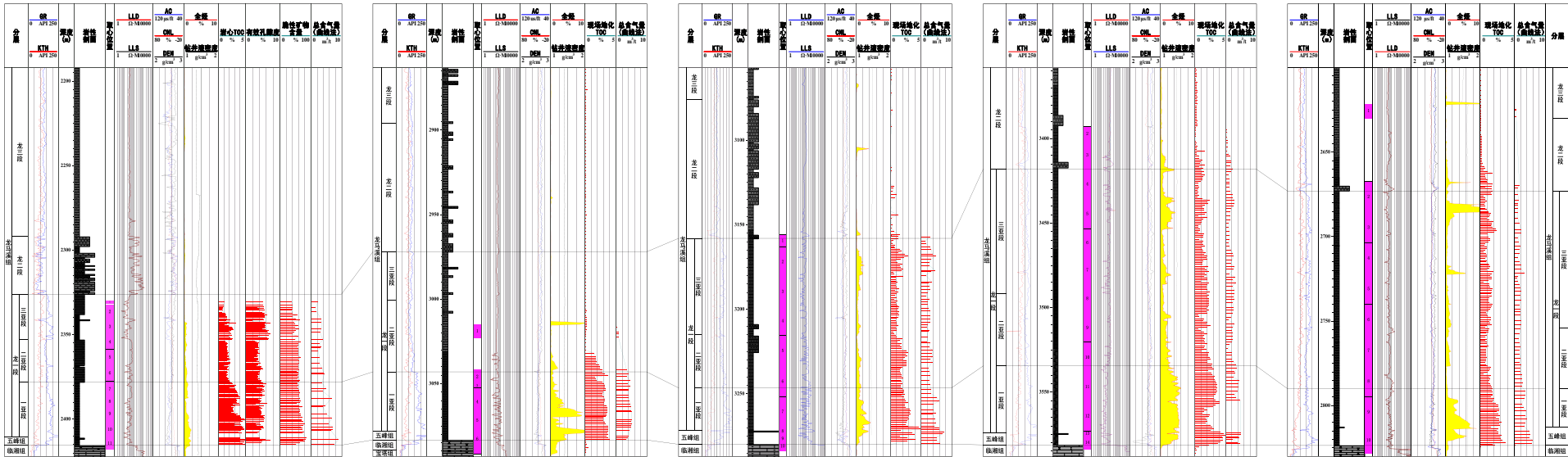
焦页1井

焦页5井

焦页6井

焦页7井

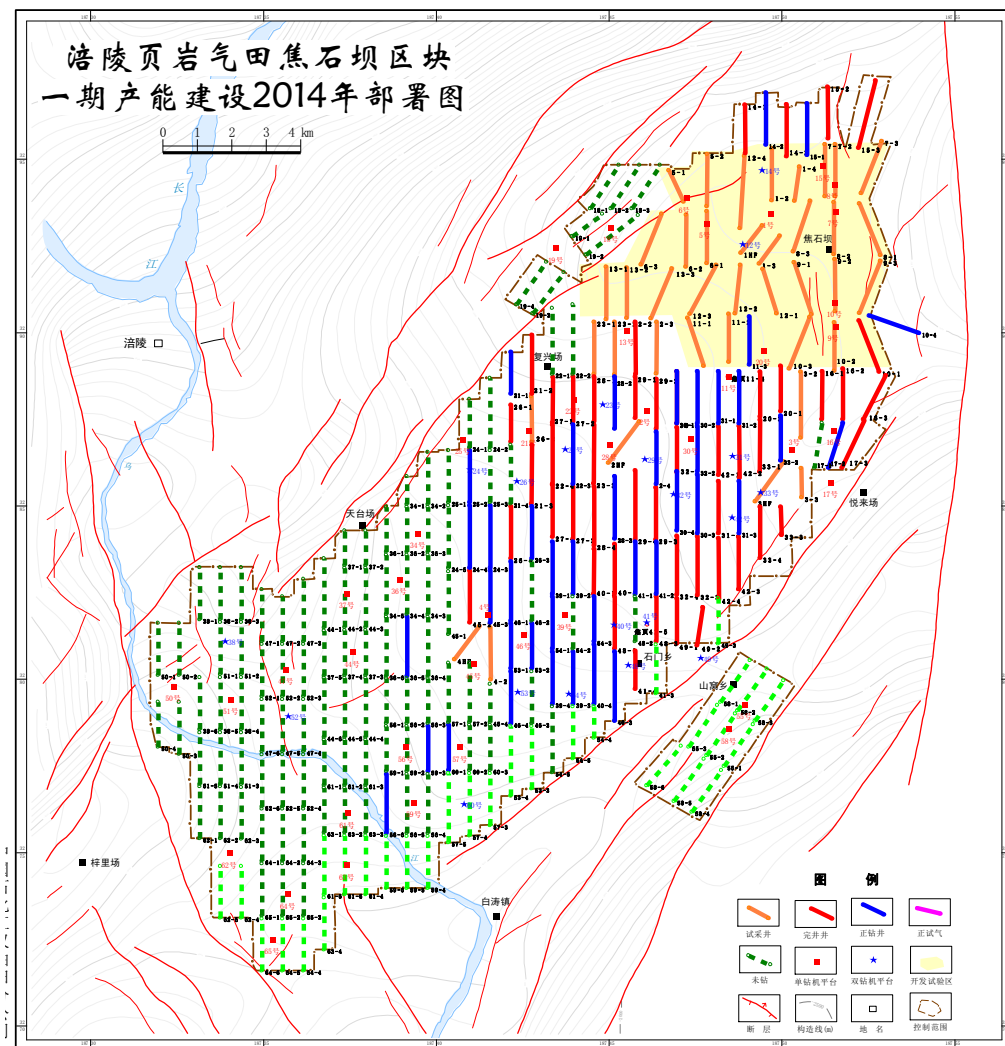
焦页8井



涪陵页岩气田开发建产进展顺利。

截至2014年12月31日，涪陵页岩气井开钻177口，完钻138口，完成压裂试气89口，建成页岩气产能25.2亿方。累产气12.24亿方，销售11.72亿方。

计划2015年建成页岩气产能50亿方，生产页岩气35亿方。

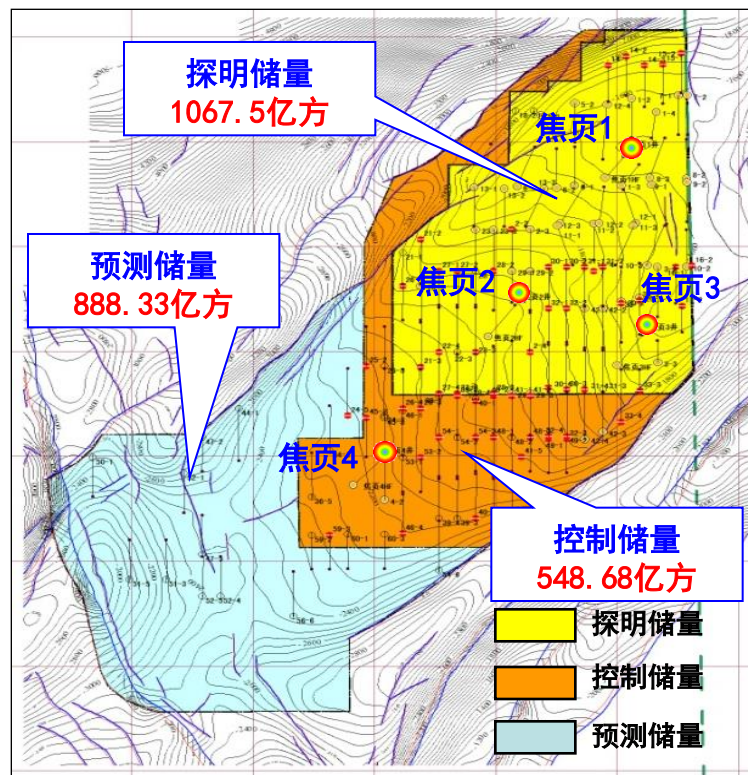


提交了国内第一个页岩气探明储量

甩开部署的焦页2HF、3HF、4HF井试获高产页岩气流，控制含气面积286平方千米，提交页岩气探明地质储量**1067.5亿方**，使中国成为除北美之外第一个实现页岩气商业性开发的国家。



焦石坝页岩气田含气面积分布图



评审专家组认为，涪陵页岩气田储层为海相深水陆棚相优质泥页岩，厚度大，分布稳定，中间无夹层，是典型的自生自储式页岩气田。气田具有气井产量高、气藏压力高、天然气组分好、试采效果好的特点，属于中深层、高压、优质天然气藏。

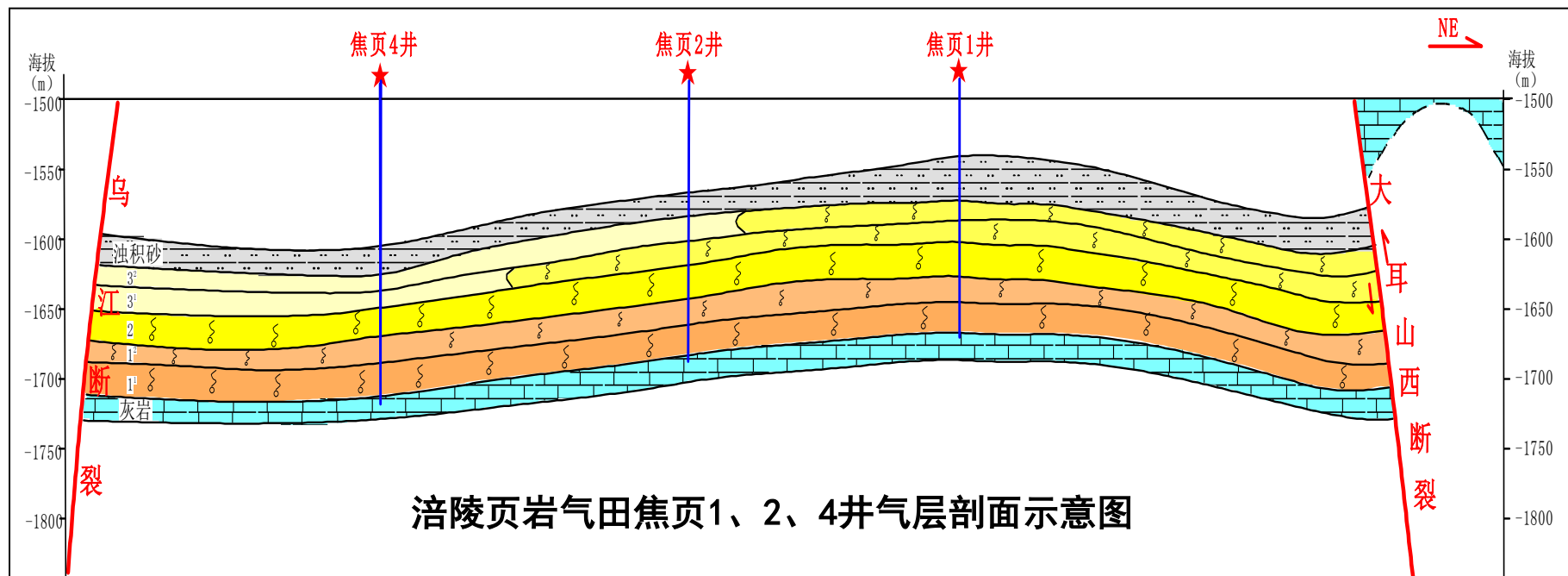
目前，涪陵页岩气田获探明地质储量**1067.50亿方**、控制储量**548.68亿方**、预测储量**888.33亿方**，三级储量**2504.51亿方**。

涪陵页岩气田是国内第一个页岩气田，也是国内第一个大型页岩气田，同时也是全球除北美以外第一个投入商业开发的大型页岩气田。

2013年9月3日，国家能源局批准设立“**重庆涪陵国家级页岩气示范区**”。

2014年4月21日，国土资源部宣布设立“**全国页岩气勘查开发示范基地**”。

2014年11月5日，在美国达拉斯举行的第五届世界页岩油气峰会，授予“**页岩油气国际先锋奖**”，以表彰北美以外世界首个页岩气重大商业发现。



提 纲

一、涪陵页岩气田发现

二、涪陵页岩气田特征

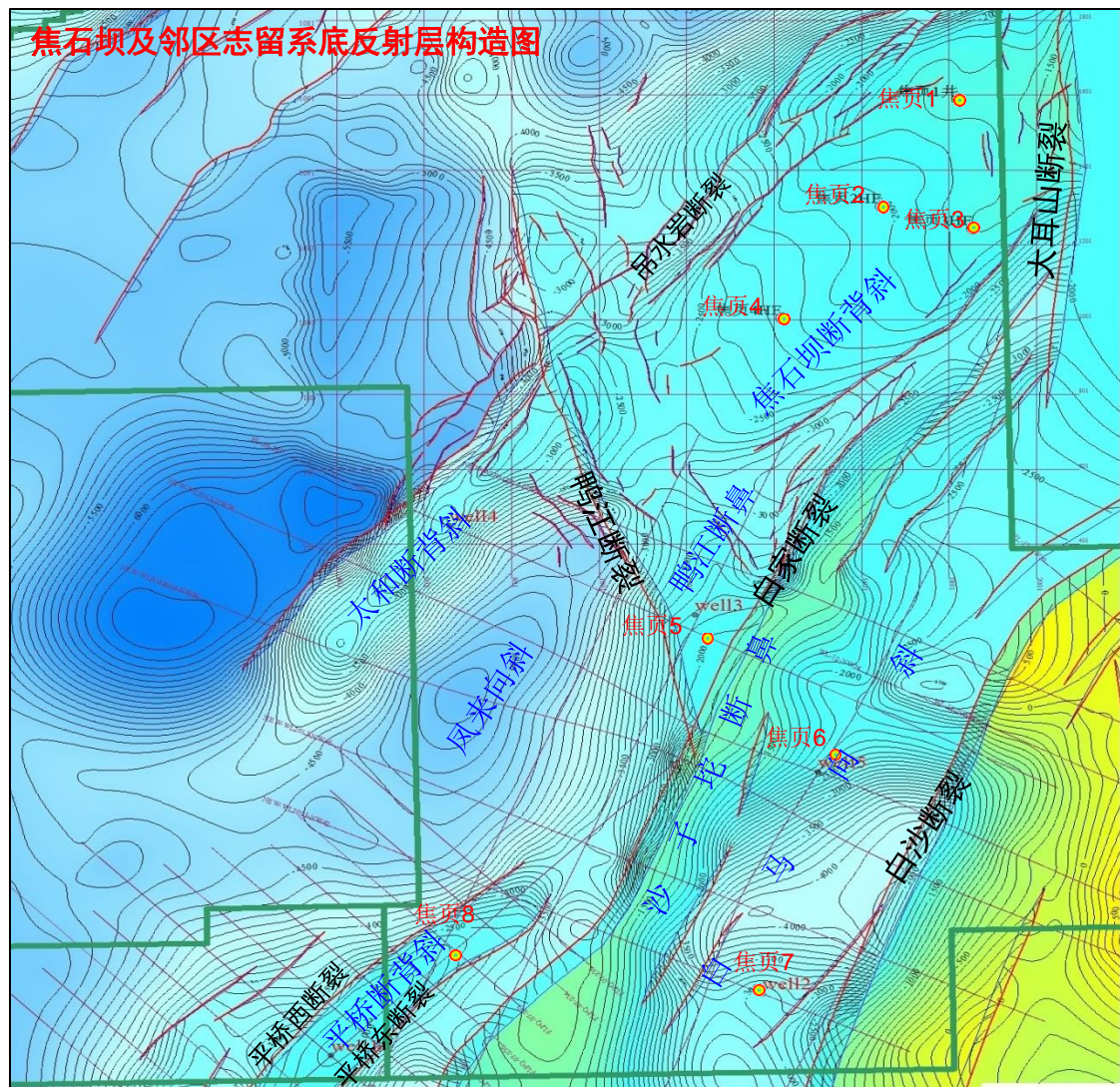
三、勘探理论与技术进展

（一）构造特征

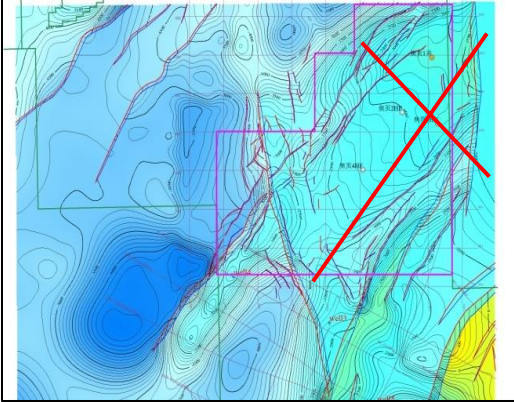
焦石坝构造带发育北东向（晚燕山期）、近南北向（喜山期）两组（两期）逆断裂。

可划分为7个四级构造单元。

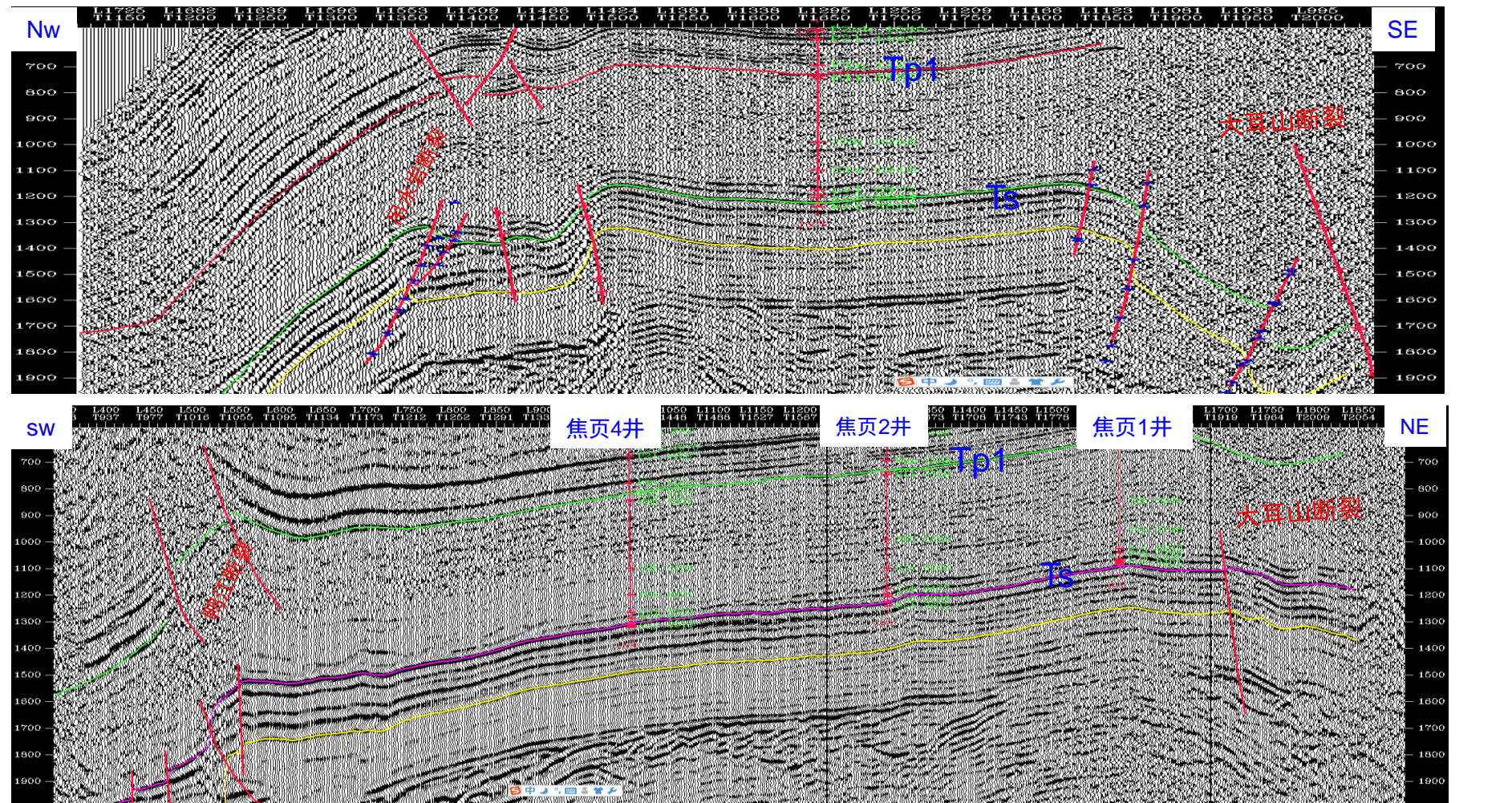
呈现“东西分带、南北分块”的格局。



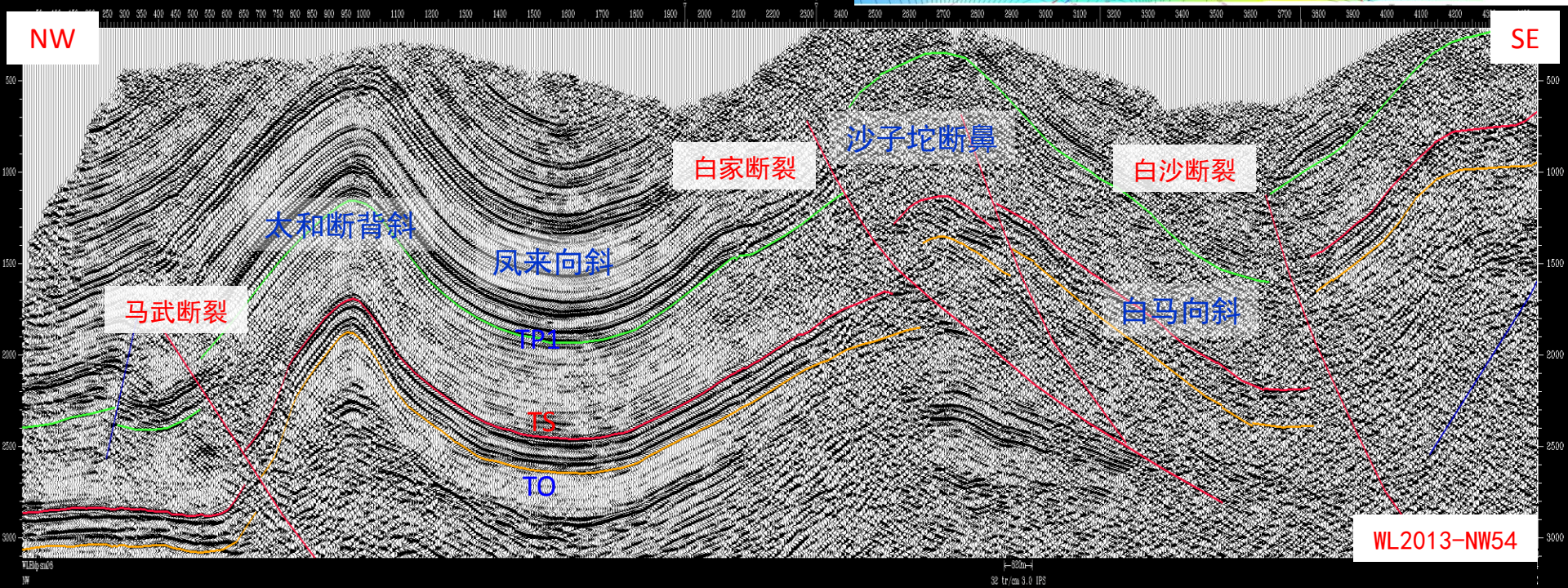
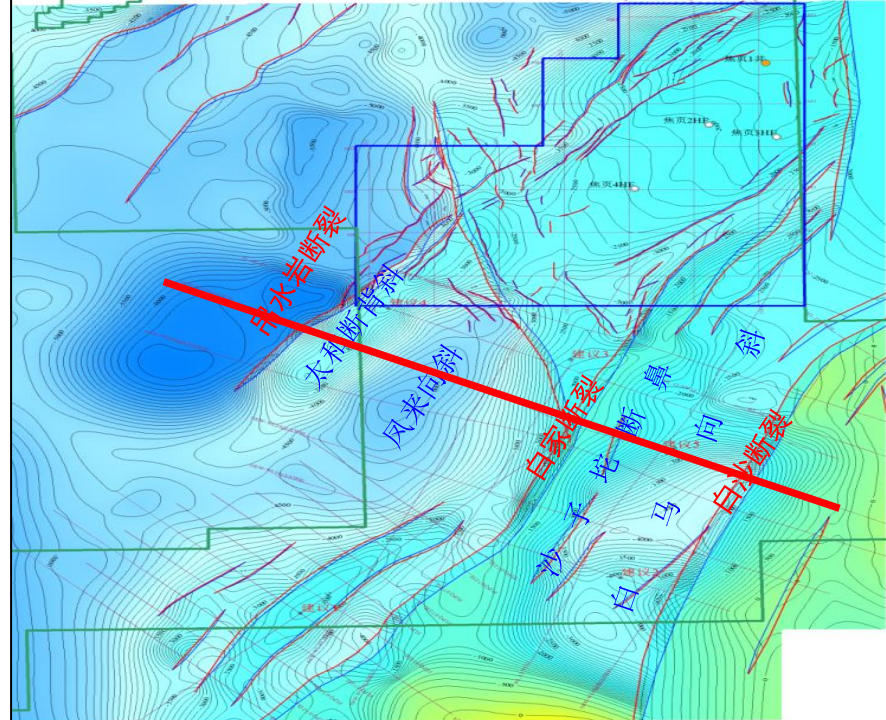
北部焦石坝主体由四周4条压扭性断层围限，地层平缓，北东至南西地层倾角在5°左右，呈“箱状”，东与大耳山背斜断凹相接，西为斜坡进入盆内。



焦页1井



南部总体为背向斜相间分布的格局。构造相对复杂，向斜埋深较大，背斜较为高陡。



(二) 地层特征

1、五峰组-龙马溪组

焦石坝地区页岩气目的层发育于上奥陶统五峰组-下志留龙马溪组。

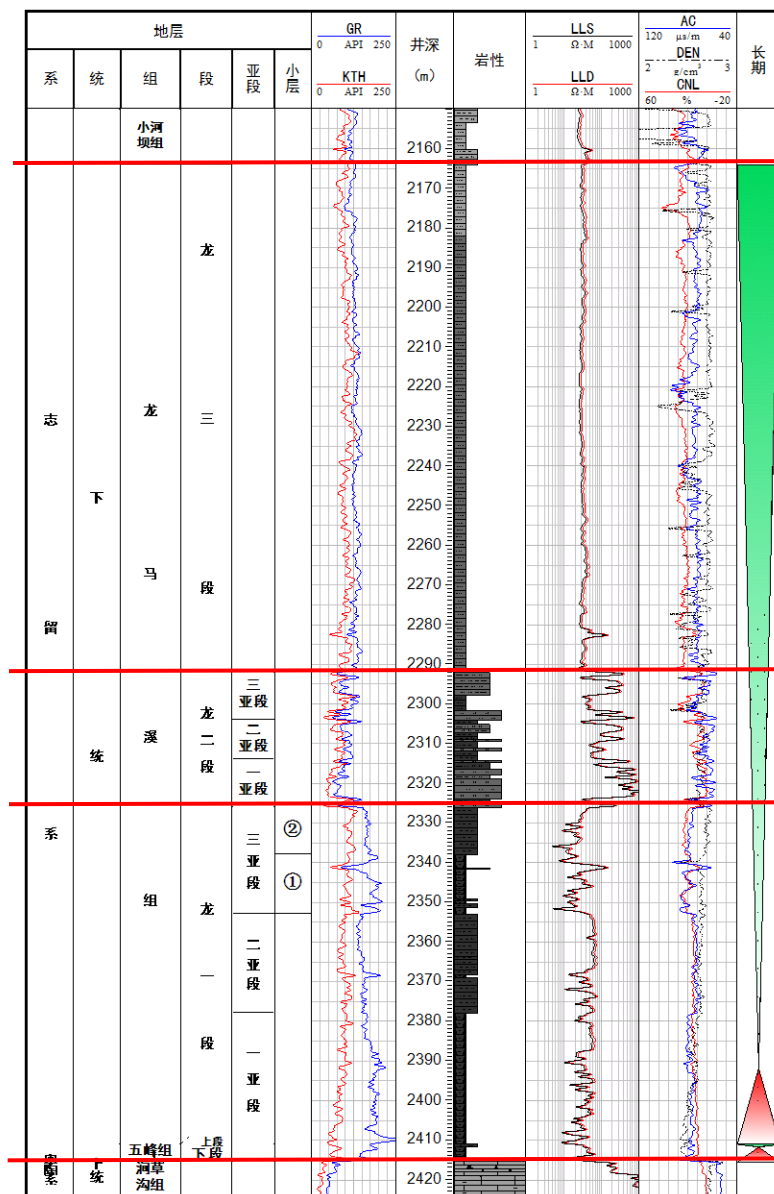
焦页1井五峰-龙马溪组厚**251.5m**，从下向上总体表现为水体逐渐变浅的沉积序列，岩性三分性特征明显：

龙马溪组三段：含粉砂质泥岩，厚**128m**；

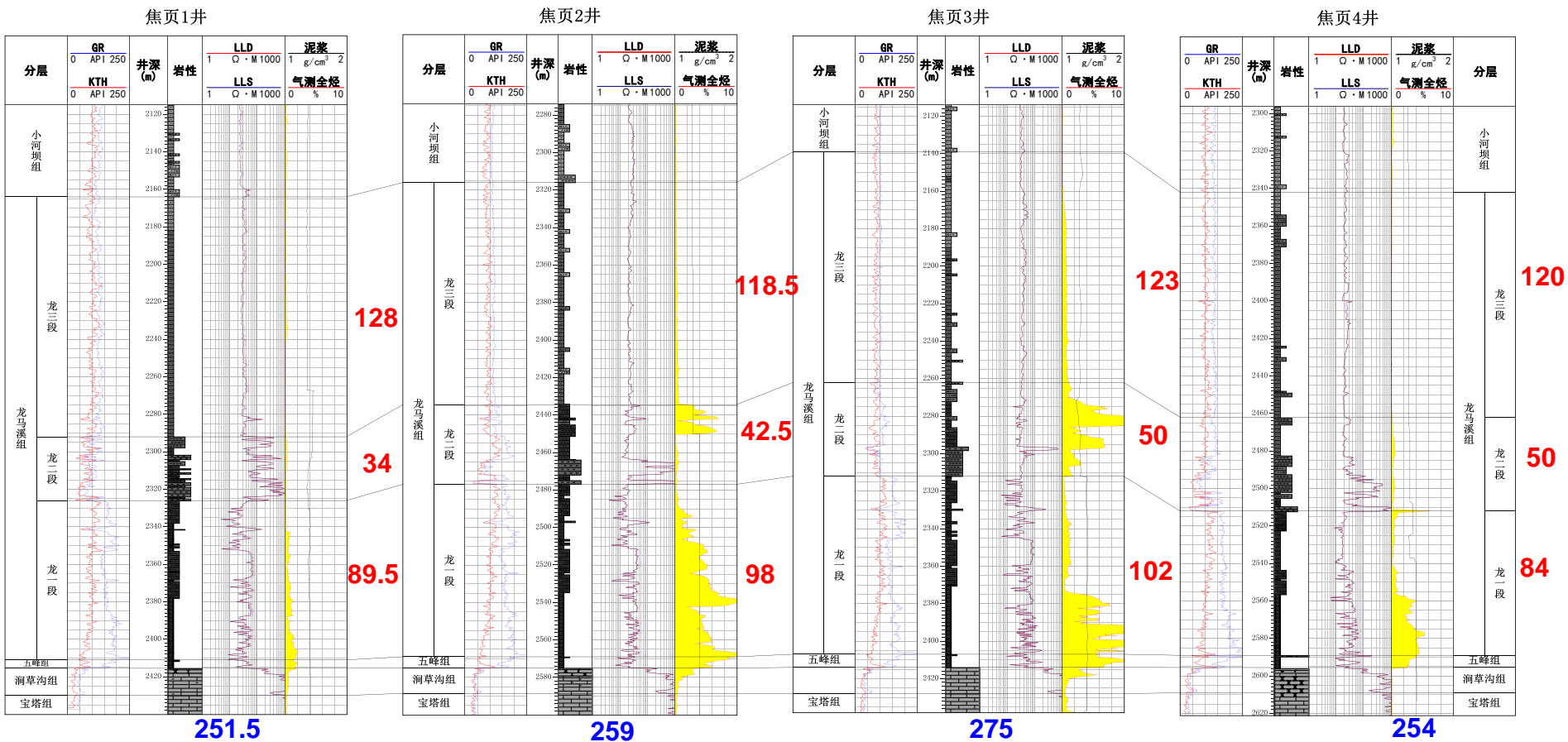
龙马溪组二段：油积砂夹粉砂质泥岩，厚**34m**；

五峰组-龙马溪组一段：灰黑色碳质笔石页岩，厚**89.5m**

焦页1井五峰-龙马溪组地层综合柱状图

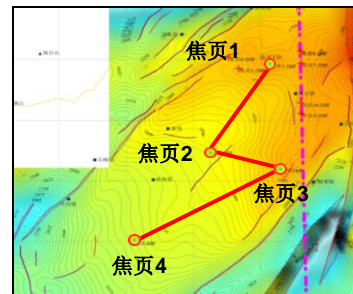


焦石坝地区五峰-龙马溪组地层综合柱状图



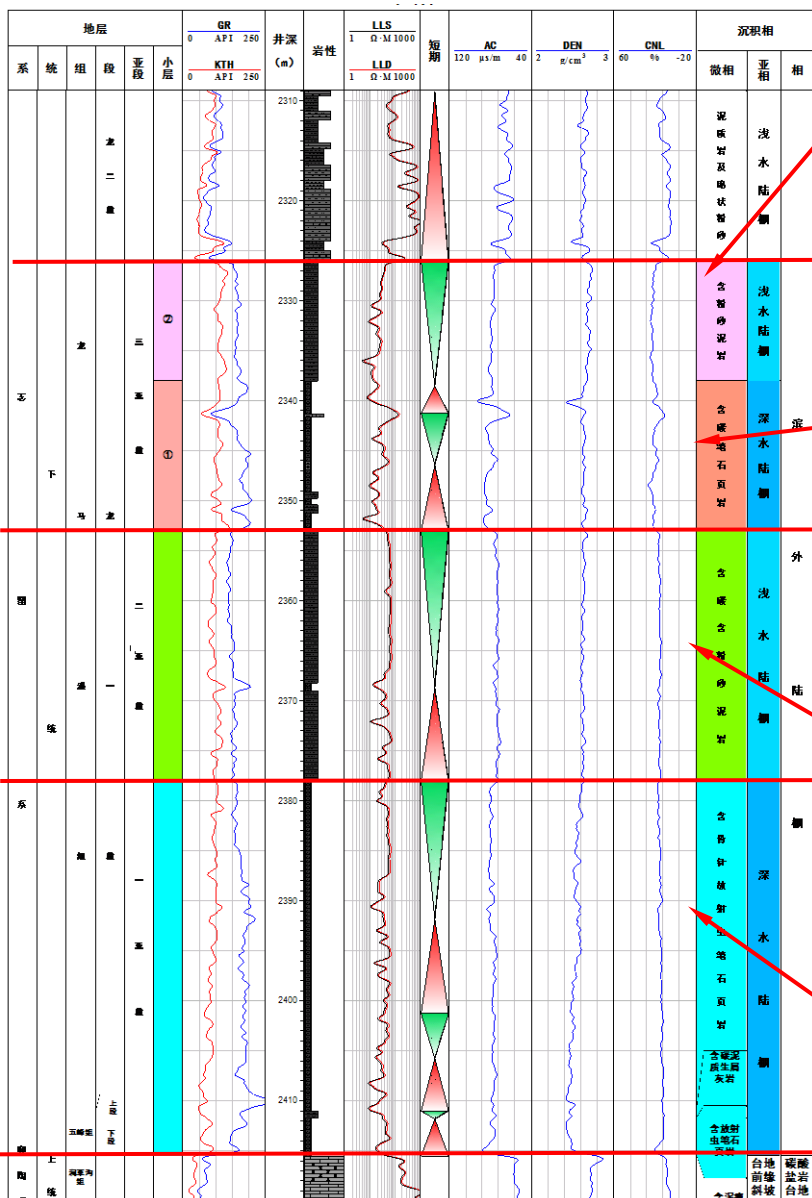
焦石坝地区五峰组-龙马溪组横向展布稳定，岩性、厚度基本相当。

五峰组-龙马溪组一段是主要的页岩气层段。



2、页岩气层段（五峰组-龙马溪组一段）

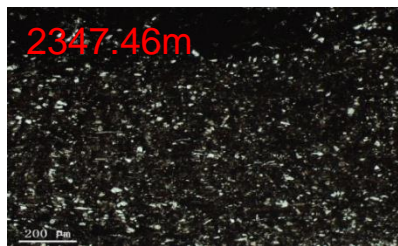
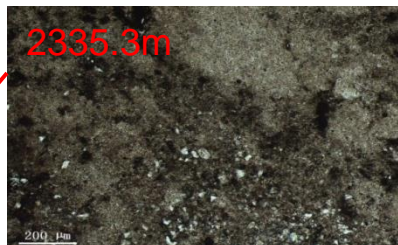
焦页1井龙马溪组一段地层综合柱状图



岩性具有三分性

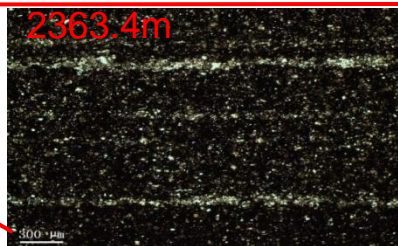
上部（Ⅲ亚段）：

含碳质笔石页岩、含粉砂泥岩，
深水和浅水陆棚沉积。厚27m。

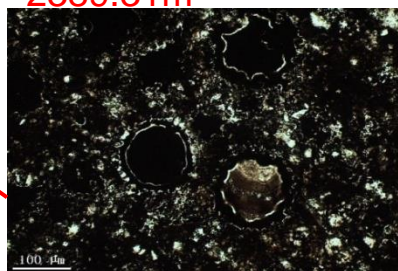


中部（Ⅱ亚段）：

含粉砂含碳泥岩，浅水陆棚沉积，厚25m。



2389.31m

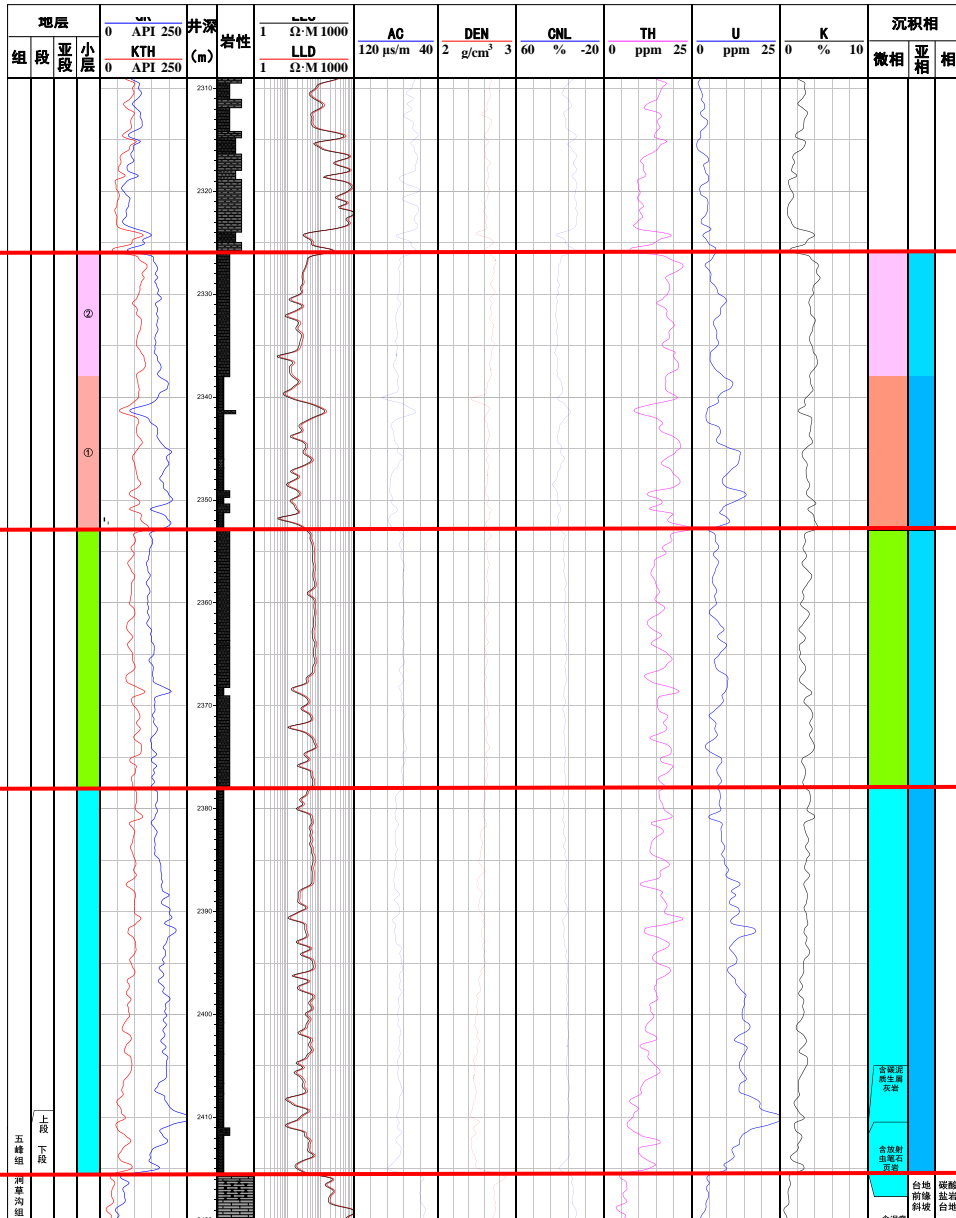


下部（Ⅰ亚段）

含骨针放射虫碳质笔石页岩，
深水陆棚沉积，厚38m。

电性同样具有三分性

焦页1井龙马溪组一段地层综合柱状图



页岩气层段总体表现为“高自然伽玛、高铀、高声波时差、高电阻率，低密度、低中子、低无铀伽马”的“四高三低”的测井响应特征。

上部（Ⅲ亚段）：

高无铀伽玛、高自然伽玛；低电阻；高声波时差、高中子、高密度；高钍、中等铀、高钾。

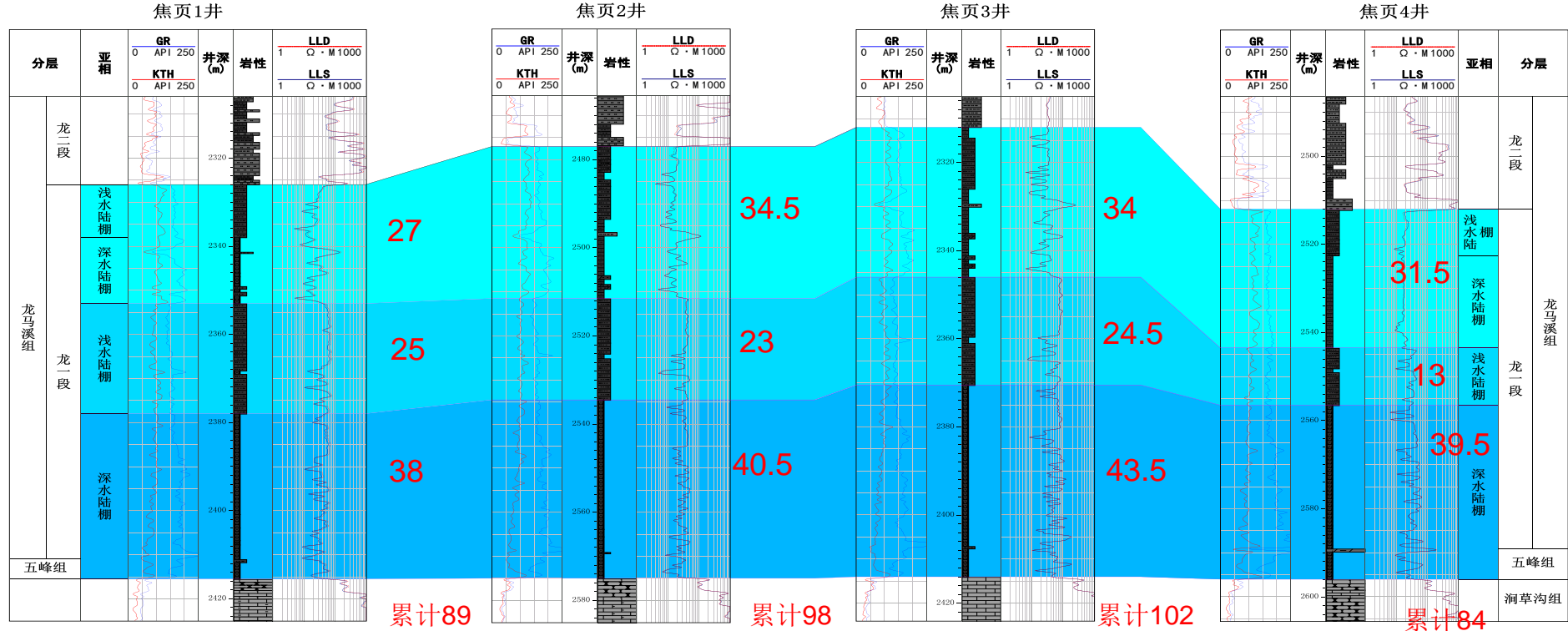
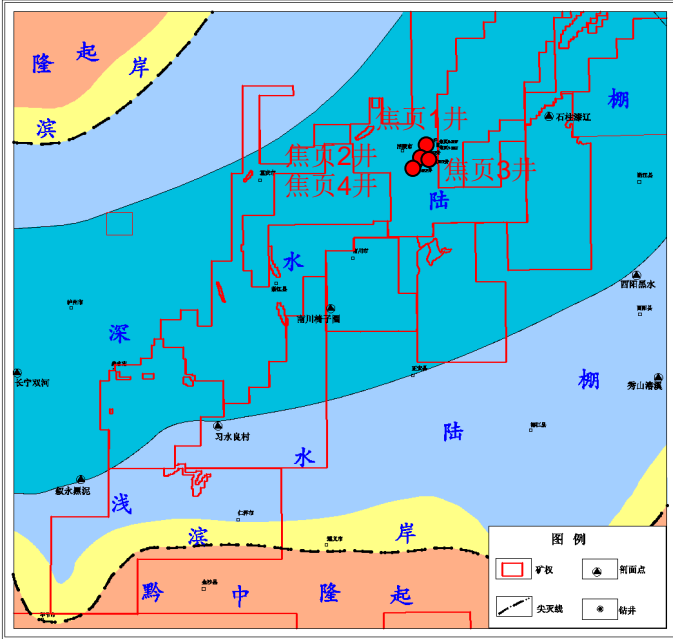
中部（Ⅱ亚段）：

中等无铀伽玛、低自然伽玛；高电阻；**低声波时差、中等中子、中等密度**；中等钍、低铀、中等钾。

下部（Ⅰ亚段）

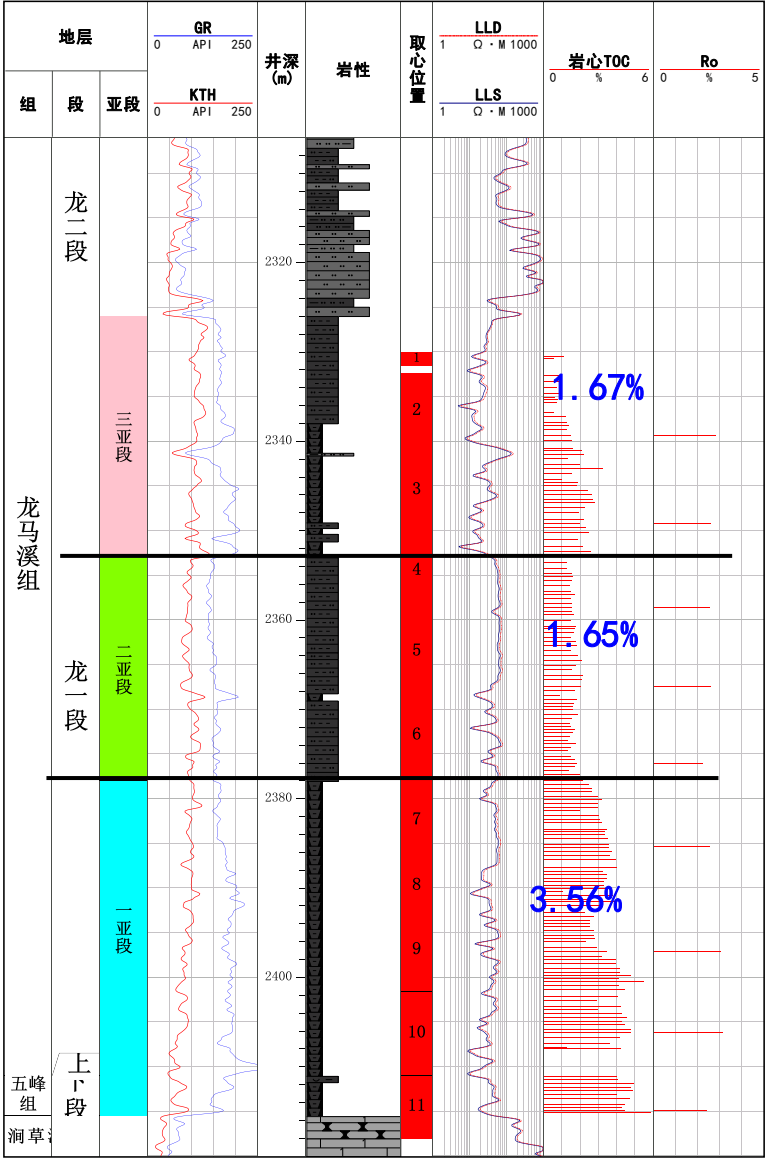
低无铀伽玛、高自然伽玛；高电阻；相对高声波时差、
低中子、低密度；低钍、高铀、低钾。

页岩气层段沉积相、岩性、厚度横向展布稳定。



(三) 有机地化特征

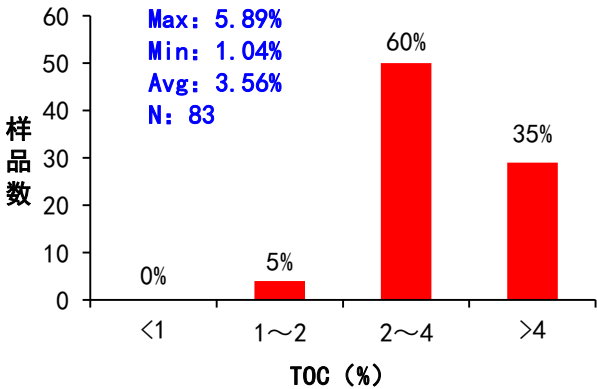
焦页1井五峰组-龙马溪组一段TOC综合评价图



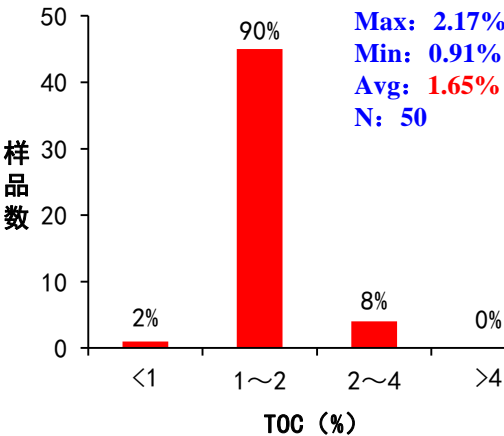
下部一亚段TOC高，且
从上向下增高，平均
3.56%。
二、三亚段TOC平均分
别为1.65%、1.67%。

有机质丰度

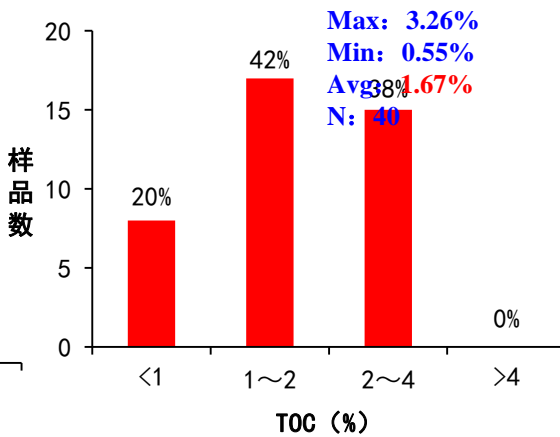
一亚段



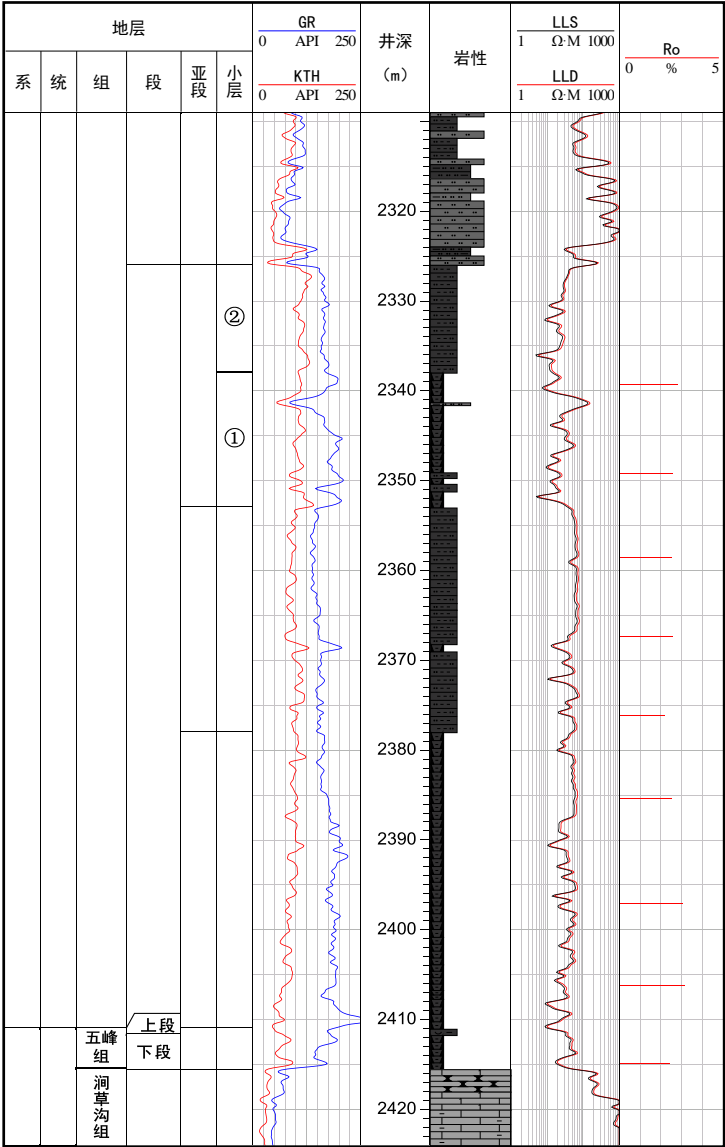
二亚段



三亚段

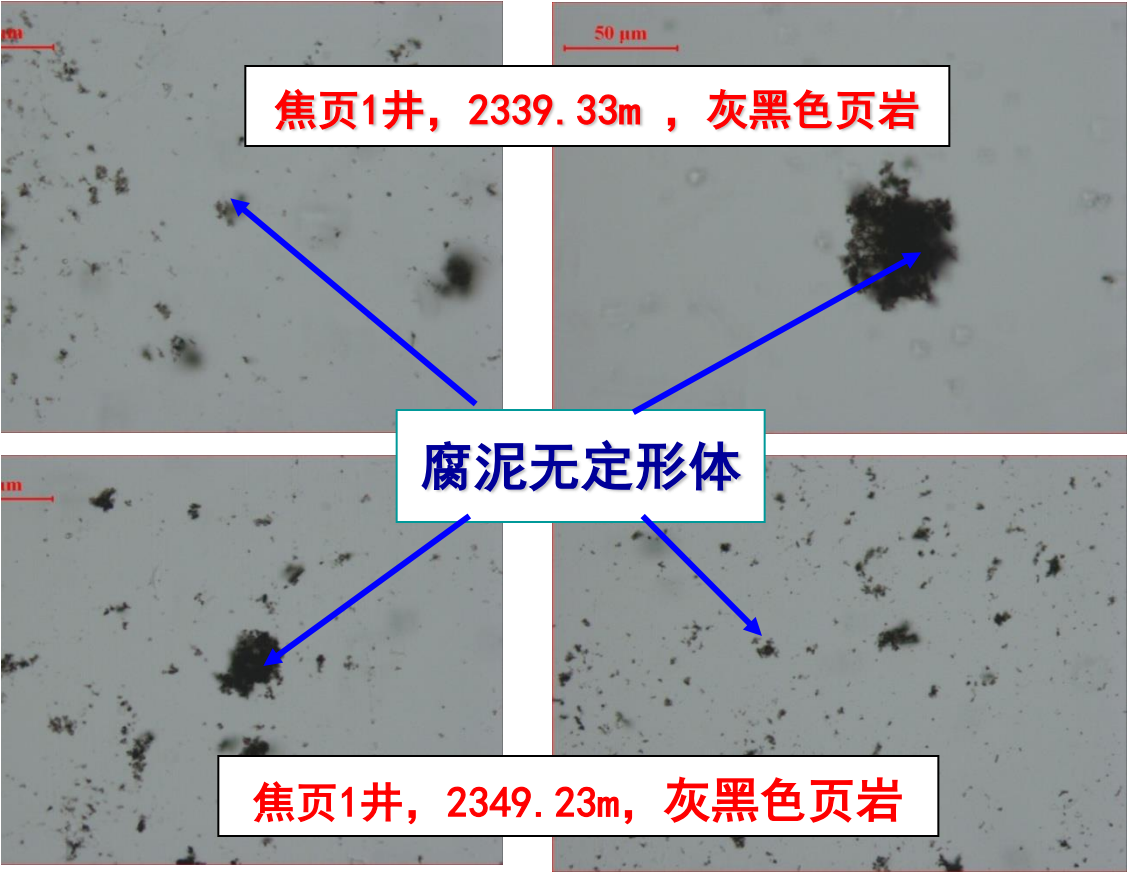


焦页1井五峰组-龙马溪组一段Ro综合评价图

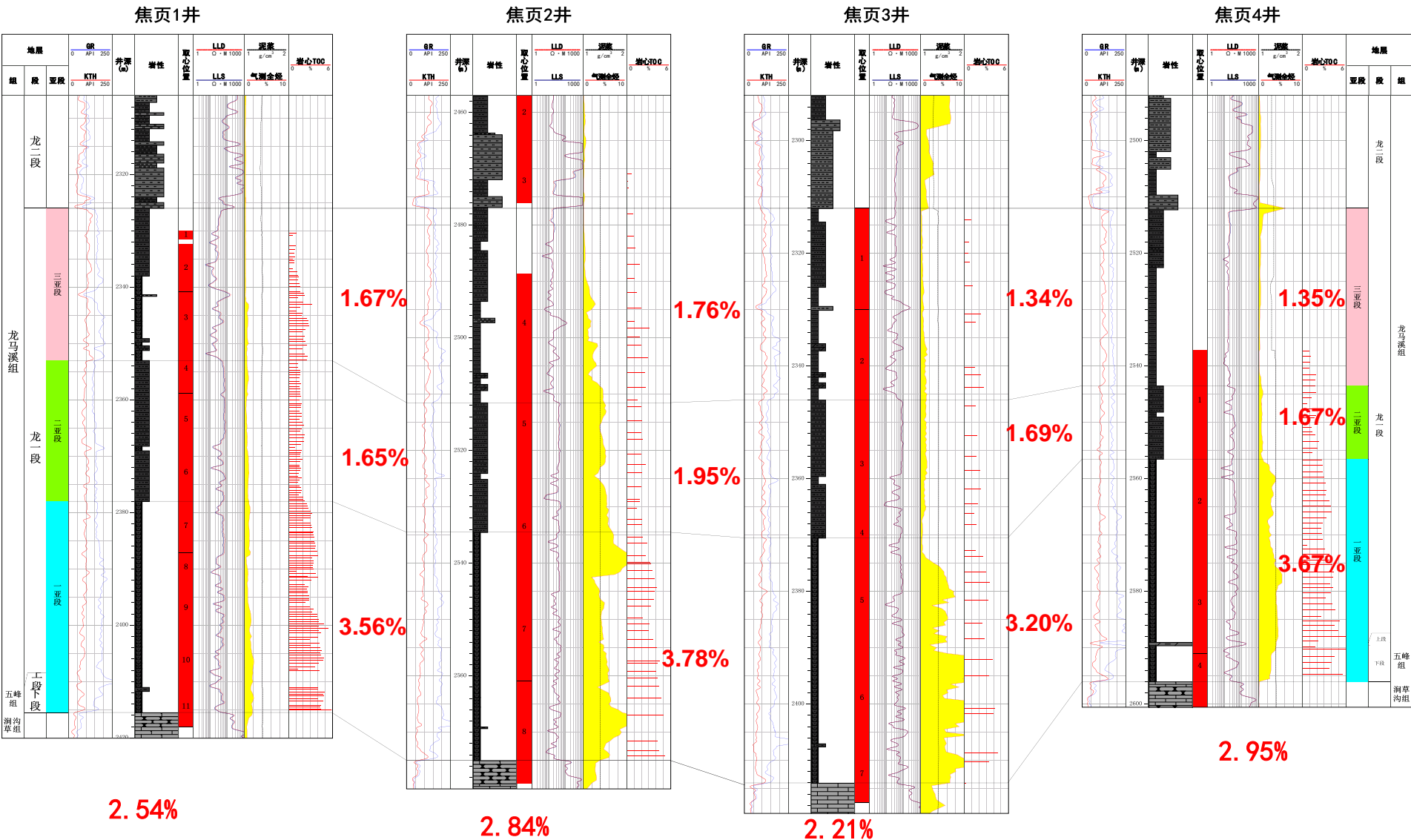


◆有机质类型好，主要为Ⅰ、Ⅱ型。

◆热演化程度适中（Ro为2.20%-3.13%，平均2.65%），处于过成熟阶段。



岩心分析TOC横向上对比性强，高TOC页岩储层主要分布在下部。



（四）矿物及岩石力学特征

1、矿物组成

从上向下脆性矿物含量增高，粘土总量降低。三分性特征明显。

III 亚段：

脆性矿物含量37.2%~63.3%；平均46.7%；硅质含量18.4%~36.8%；平均28.3%；粘土矿物含量36.7%~62.8%；平均53.3%

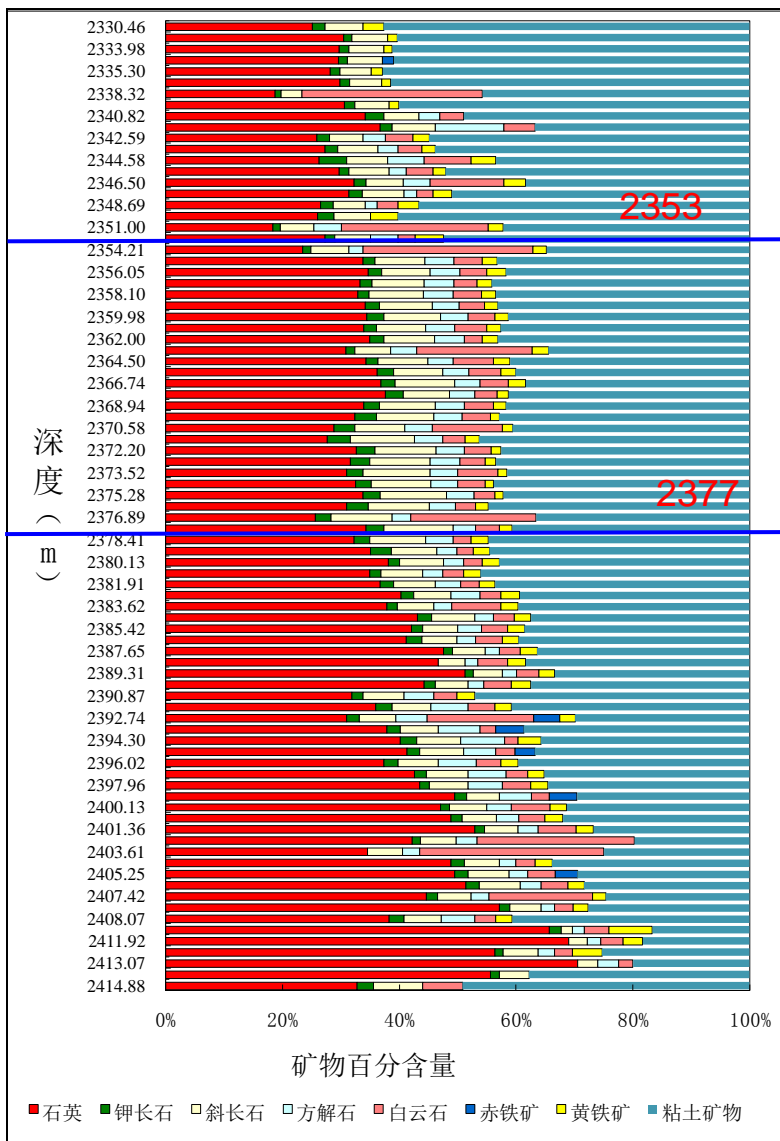
II 亚段：

脆性矿物含量47.7%~65.6%；平均58.1%；硅质含量23.5%~37.7%；平均28.3%；粘土矿物含量34.4%~52.3%；平均41.9%

I 亚段：

脆性矿物含量50.9%~83.4%；平均65.7%；硅质含量31.0%~71.6%；平均44.4%；粘土矿物含量16.6%~49.1%；平均34.1%

焦页1井五峰组-龙马溪组矿物成分分布图



2、岩石力学特征

总体表现为**较高杨氏模量、低泊松比特征**。从上向下，岩石脆性指数增高，可压性变好。

焦页1井五峰组-龙马溪组一段泥页岩实测岩石力学参数及脆性指数计算

	井深 (m)	岩心 编号	围压 /Mpa	杨氏 模量 /Gpa	泊松比	抗压 强度 /Mpa	脆性 系数 BI	取值				计算脆性系数BI过 程数据	
								杨氏模 量 /Gpa	泊松比	抗压强度 /Mpa	脆性指 数 B_{rit}	μ_{Brit}	E_{Brit}
三 亚 段	2367.98 - 2368.15	水平 0°	20	32.66	0.22	174.65	52.38	29.87	0.23	149.45	47.33	32.37	72.40
		水平 45°	20	33.41	0.24	171.57	48.72					33.44	64.00
		水平 90°	20	23.56	0.24	102.14	40.88					19.36	62.40
二 亚 段	2372.7- 2372.88	水平 0°	20	34.38	0.25	198.22	48.01	33.00	0.23	179.98	51.09	34.83	61.20
		水平 45°	20	33.57	0.23	189.74	51.04					33.68	68.40
		水平 90°	20	31.04	0.20	151.99	54.23					30.06	78.40
一 亚 段	2389.18 - 2389.29	水平 0°	20	34.69	0.22	202.65	53.24	32.39	0.21	212.92	53.46	35.27	71.20
		水平 45°	20	33.87	0.22	246.46	52.85					34.10	71.60
		水平 90°	20	28.61	0.20	189.65	54.29					26.58	82.00
	2413.21 - 2413.28	水平 0°	20	26.00	0.13	207.66	65.63	24.49	0.13	159.50	63.62	22.86	108.4
		水平 45°	20	22.56	0.11	76.86	66.37					17.94	114.8
		水平 90°	20	24.91	0.16	193.98	58.85					21.31	96.40

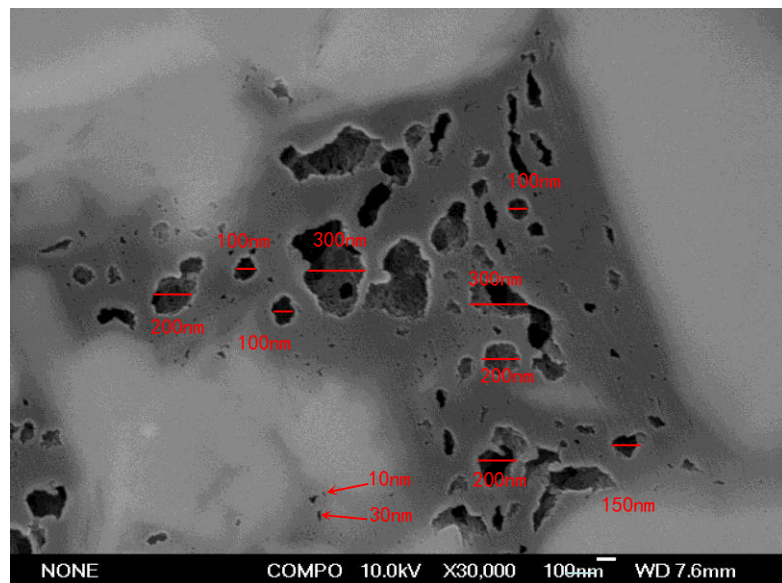
（五）孔隙结构与物性特征

1、主要发育三类纳米级孔隙

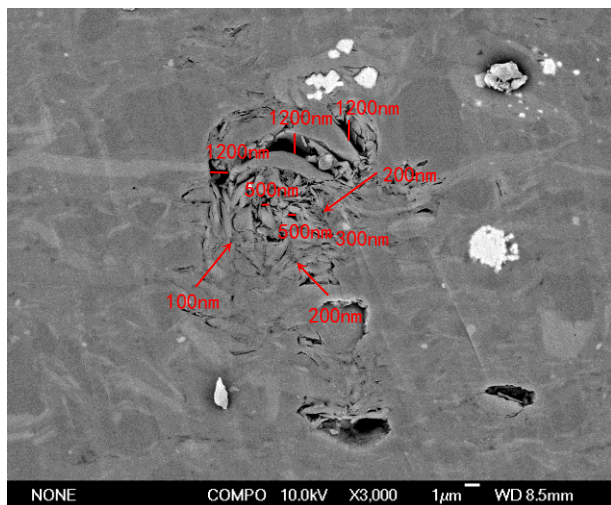
主要孔隙类型：有机质孔、粘土矿物

孔和脆性矿物孔（晶间孔、次生溶蚀孔等）。

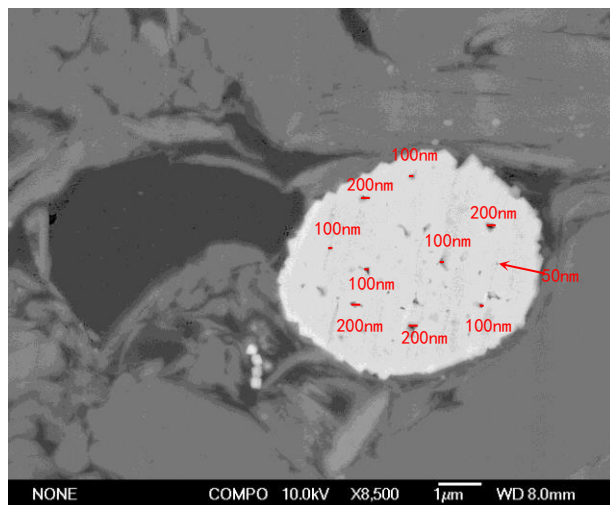
孔径：主要分布在2-300nm之间，以中孔为主。



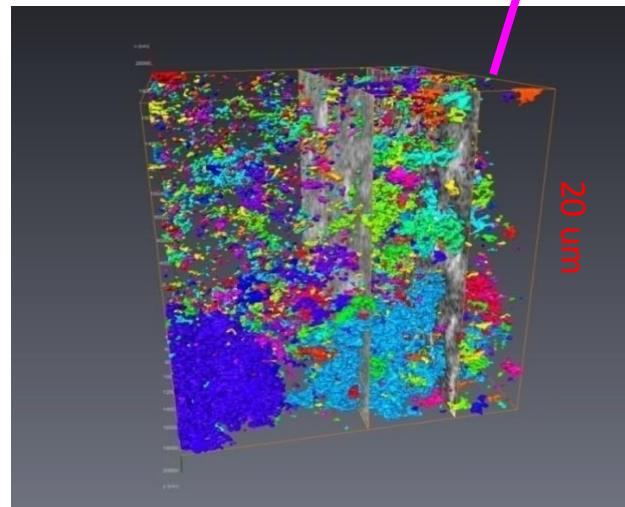
有机质孔，焦页1井，2385.42m



粘土矿物孔隙，焦页1井，2335.30m



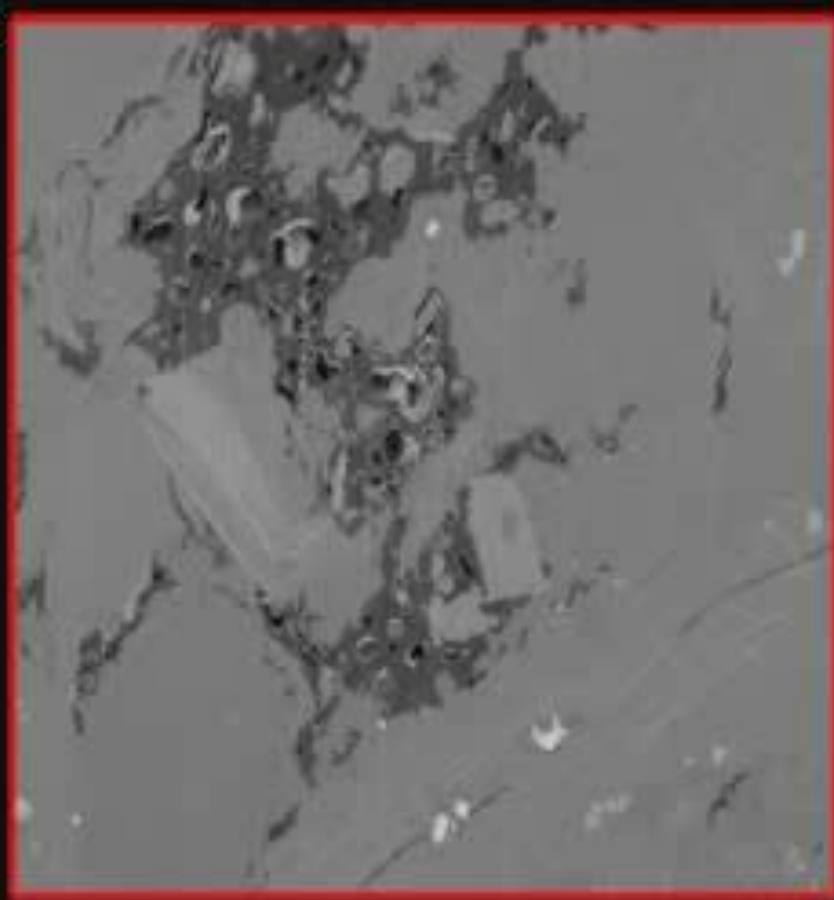
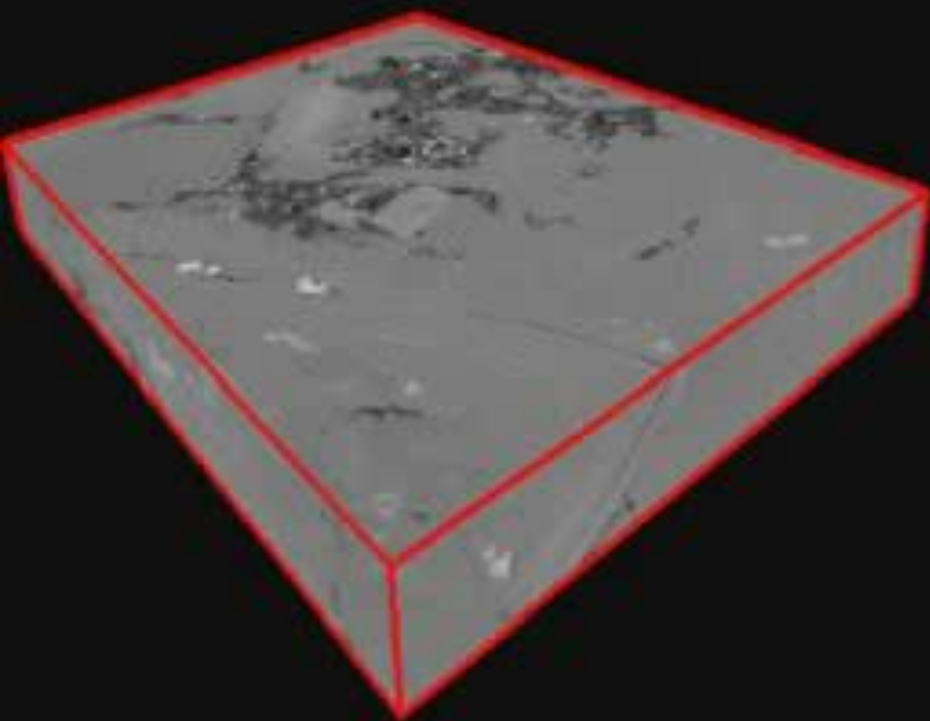
黄铁矿晶间孔隙，焦页1井，2411.05m



纳米CT显示孔隙分布

H20140922-locnA-R2

z axis



焦页1井深水陆棚相碳质页岩有机孔3D-FIB特征

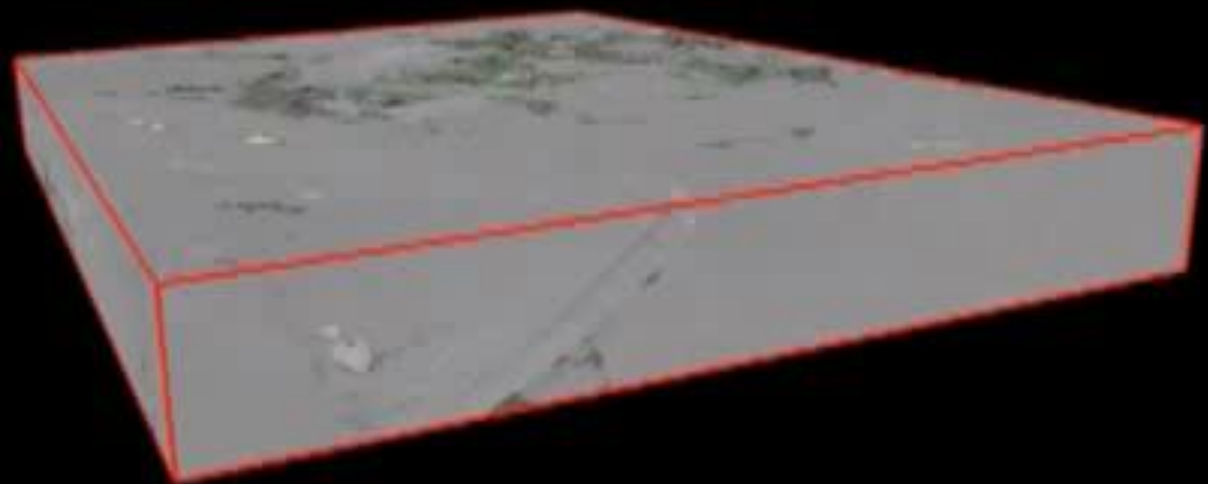
1120140022 Loch A Run 2

CD-71215

Porosity .50%

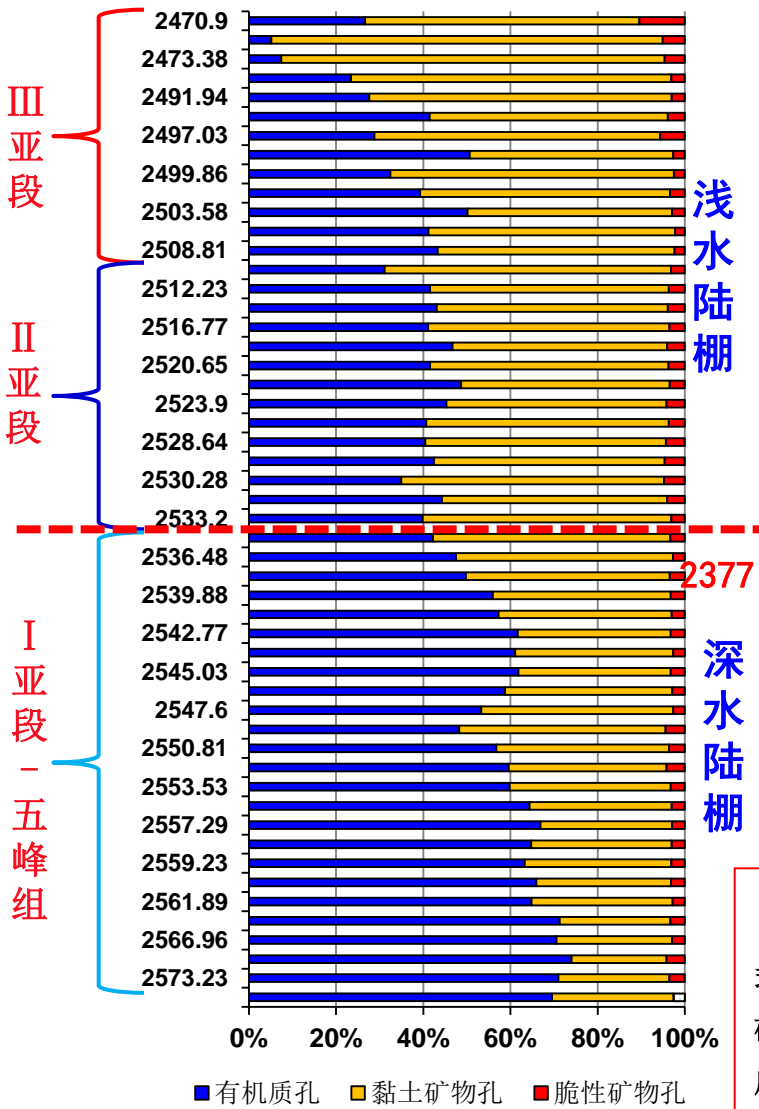
Organics 13.46%

High Density .25%



2、深水陆棚以有机质孔为主

焦页2井五峰-龙马溪组孔隙构成分布图



有机质孔与粘土矿物孔对孔隙度贡献大，占总孔隙的90%左右。

深水陆棚以有机质孔为主，浅水陆棚以粘土矿物孔为主。

焦石坝地区五峰组-龙马溪组三类孔隙所占比例统计表

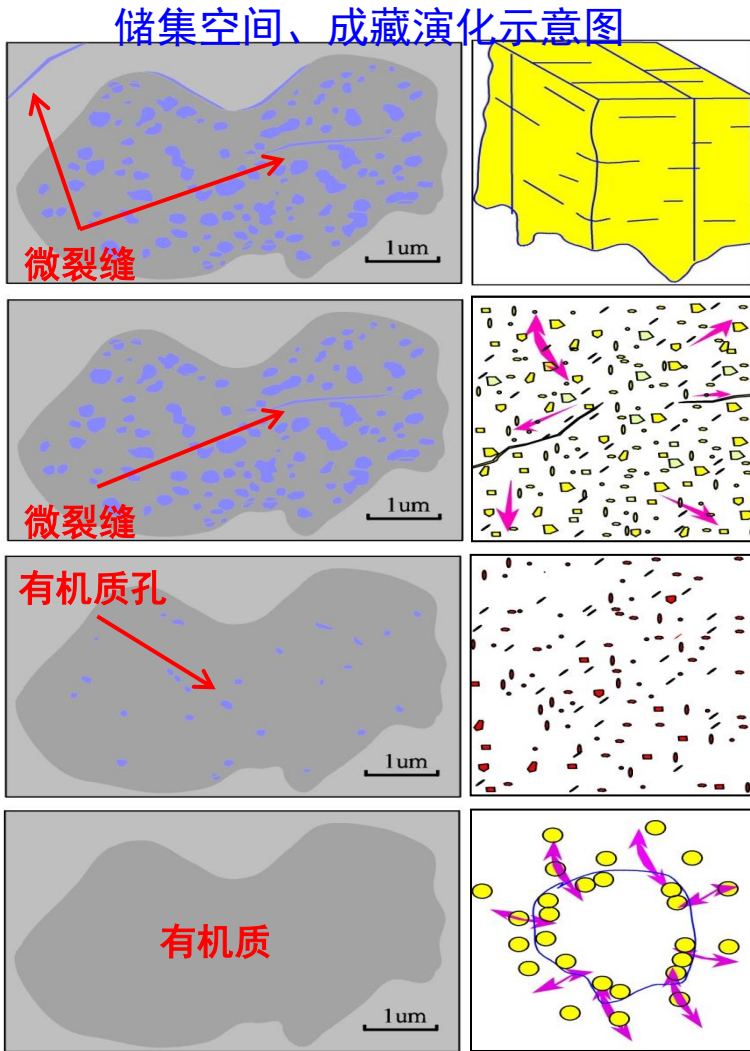
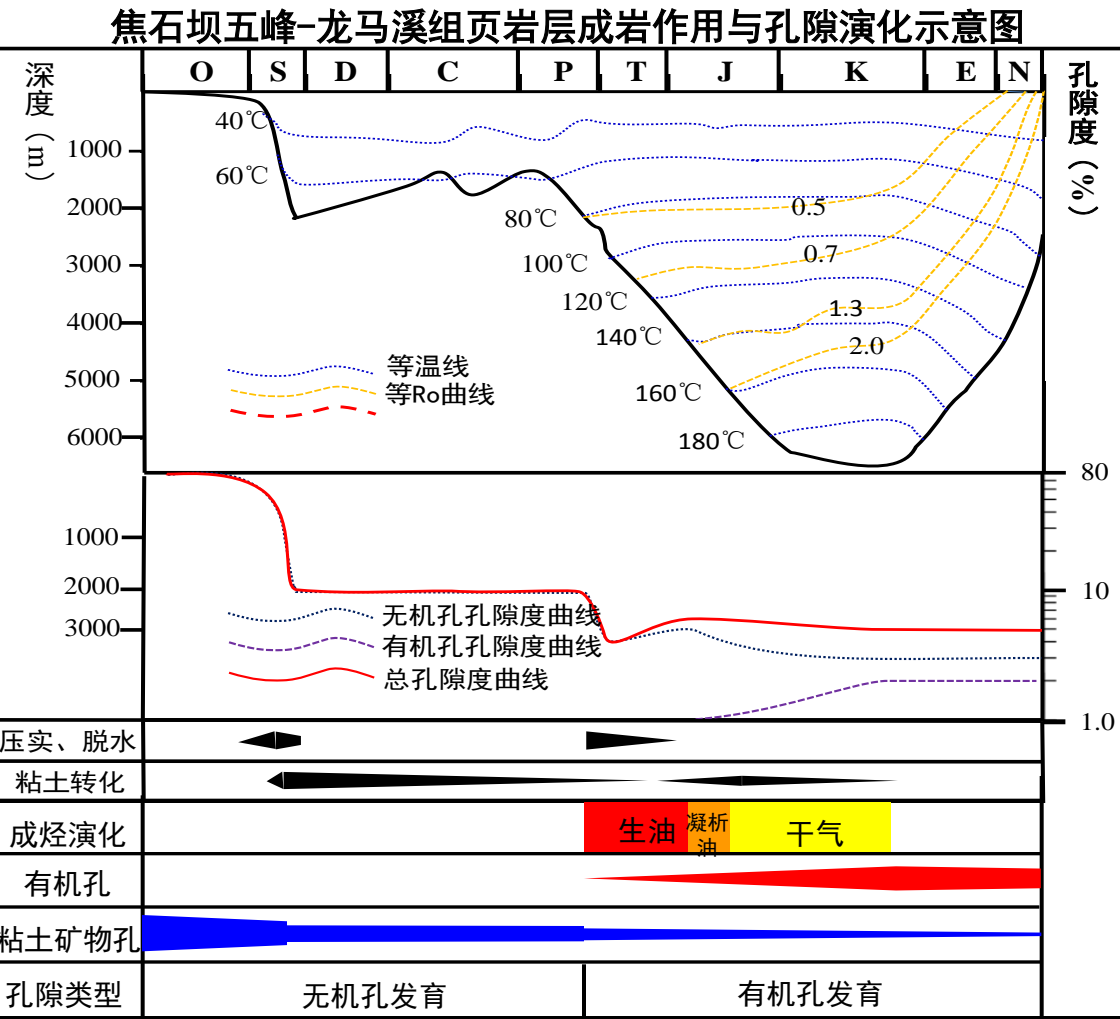
井名	分层			平均总孔隙度 (%)	孔隙所占比例平均值 (%)			样点数
	地层	亚段	井段 (m)		脆性矿物孔	粘土矿物孔	有机孔	
焦页1井	龙一段	III	2326-2353	5.36	4.2	71	24	20
		II	2353-2378	3.72	6	64	30	26
	五峰组	I	2378-2415.5	4.6	5.9	43	51	40
焦页2井	龙一段	III	2477-2511	5.33	3.2	60	37	11
		II	2511-2534.5	4.82	4	53	43	12
	五峰组	I	2534.5-2575	6.34	3.2	37	60	26
焦页4井	龙一段	III	2512-2543.5	5.2	9.7	76	14	2
		II	2543.5-2557	5.01	13	60	27	5
	五峰组	I	2557-2596	6.19	11	38	51	12

$$\Phi = \rho \times A_{Bri} \times V_{Bri} + \rho \times A_{clay} \times V_{clay} + \rho \times A_{Toc} \times V_{toc}$$

式中：Φ表示页岩孔隙度，%；ρ-表示页岩岩石密度，t/m³；A_{Bri}、A_{clay}、A_{Toc}分别表示脆性矿物、粘土和有机质三者的质量百分含量；V_{Bri}、V_{clay}、V_{Toc}分别表示脆性矿物、黏土和有机质三者单位质量内微孔隙体积，m³/t。

3、有机质孔的发育与有机质热演化生烃匹配关系好

研究发现， R_o 达到0.7%以上时，有机质孔隙开始发育；进入高-过成熟阶段，大量的有机质孔形成，为页岩气的自生自储提供了有效的空间。



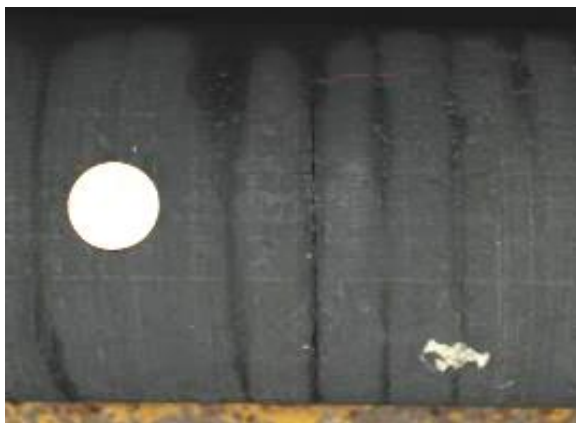
4、水平缝发育

层理间缝、层间滑动缝等水平缝

广泛发育

高角度缝主要发育于底部，多为

方解石充填。

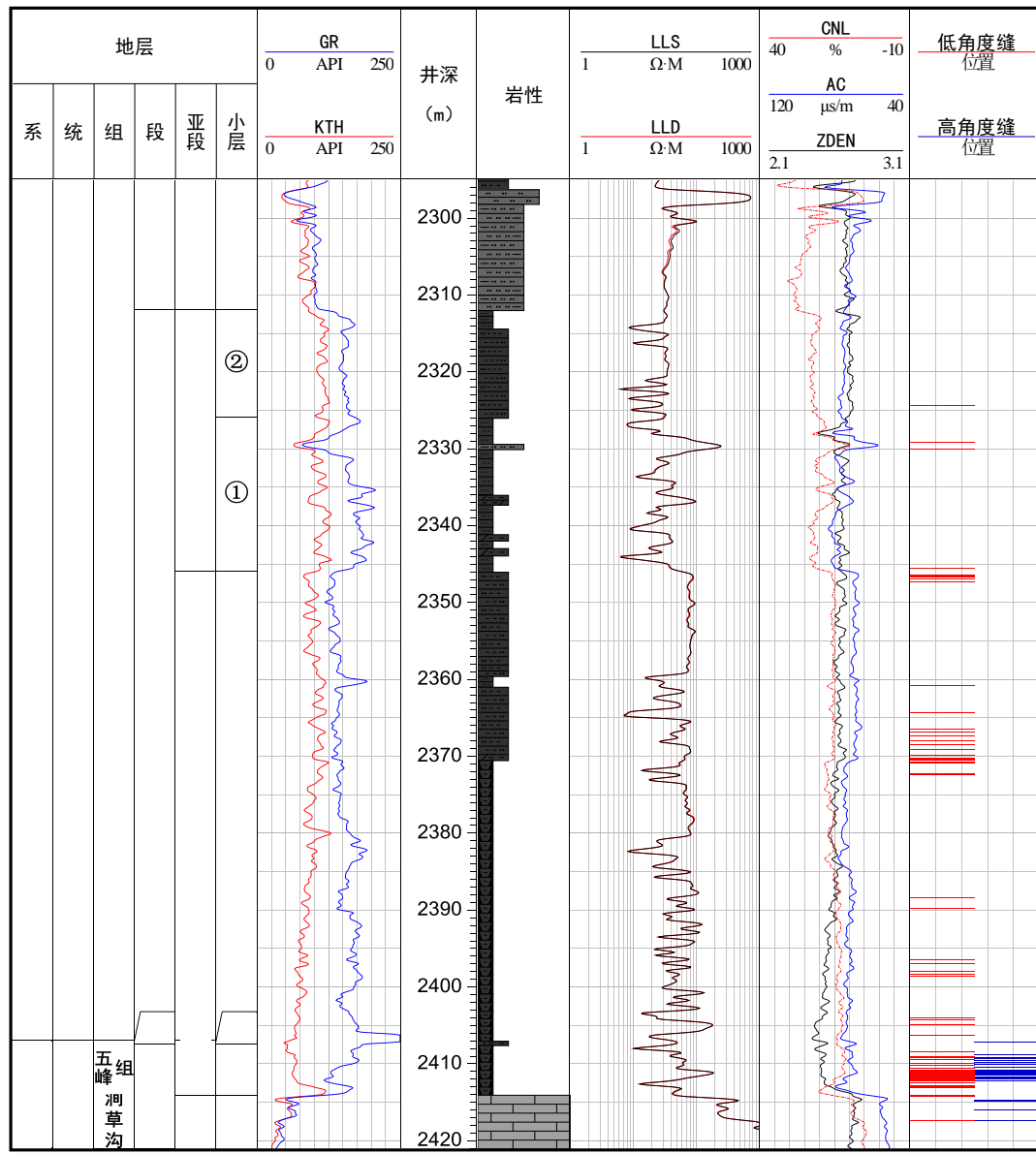


层间页理缝，焦页4井，2590.58m

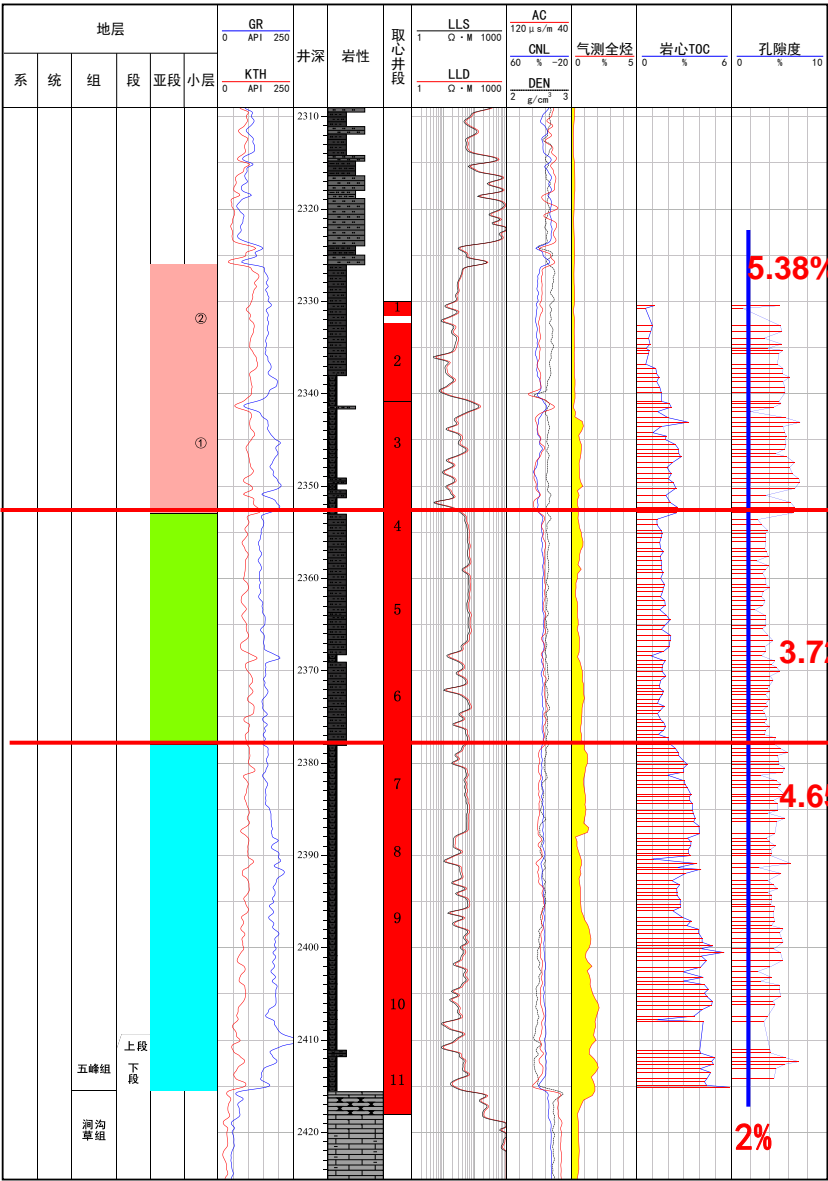


层间滑动缝，焦页4井，2592.08m

焦页3井五峰组-龙马溪组一段裂缝分布图



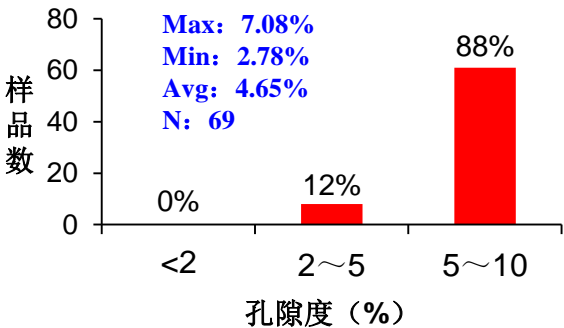
焦页1井五峰组-龙马溪组一段孔隙度综合评价图



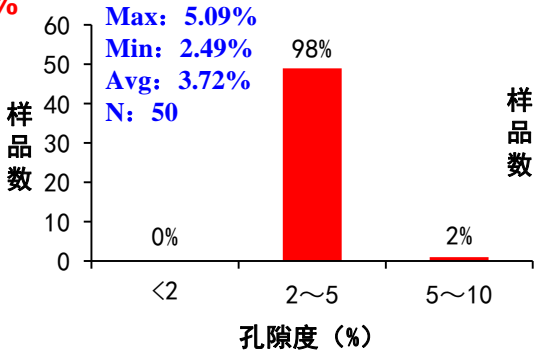
5、孔隙度具有明显的三分性

一、三亚段较高，孔隙度主要集中在5-8%，二亚段主要集中在2-5%之间。

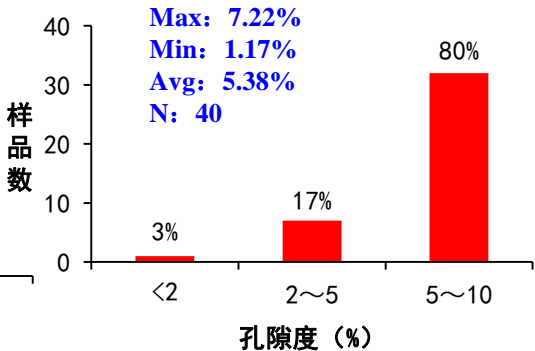
一亚段孔隙度



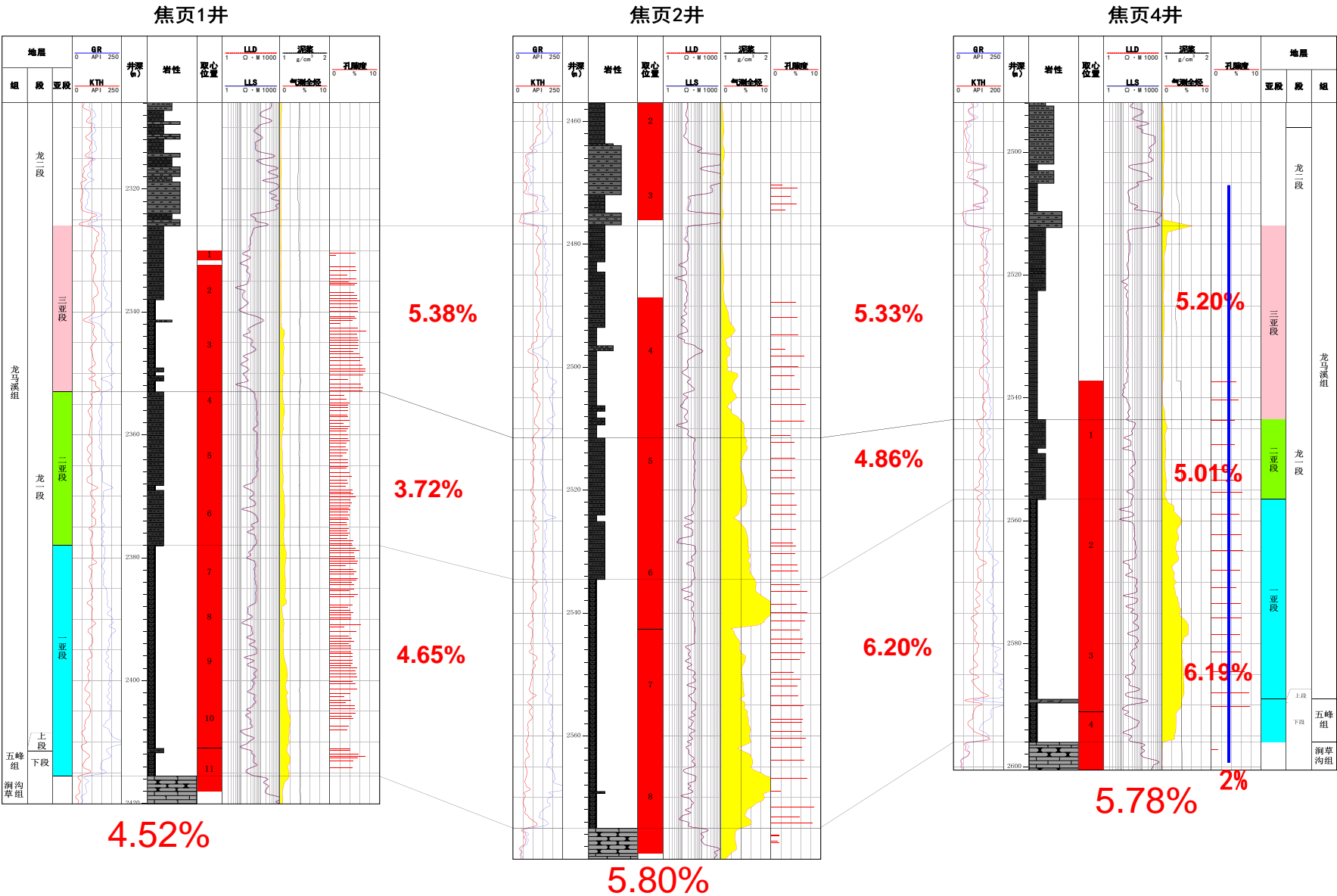
二亚段孔隙度



三亚段孔隙度

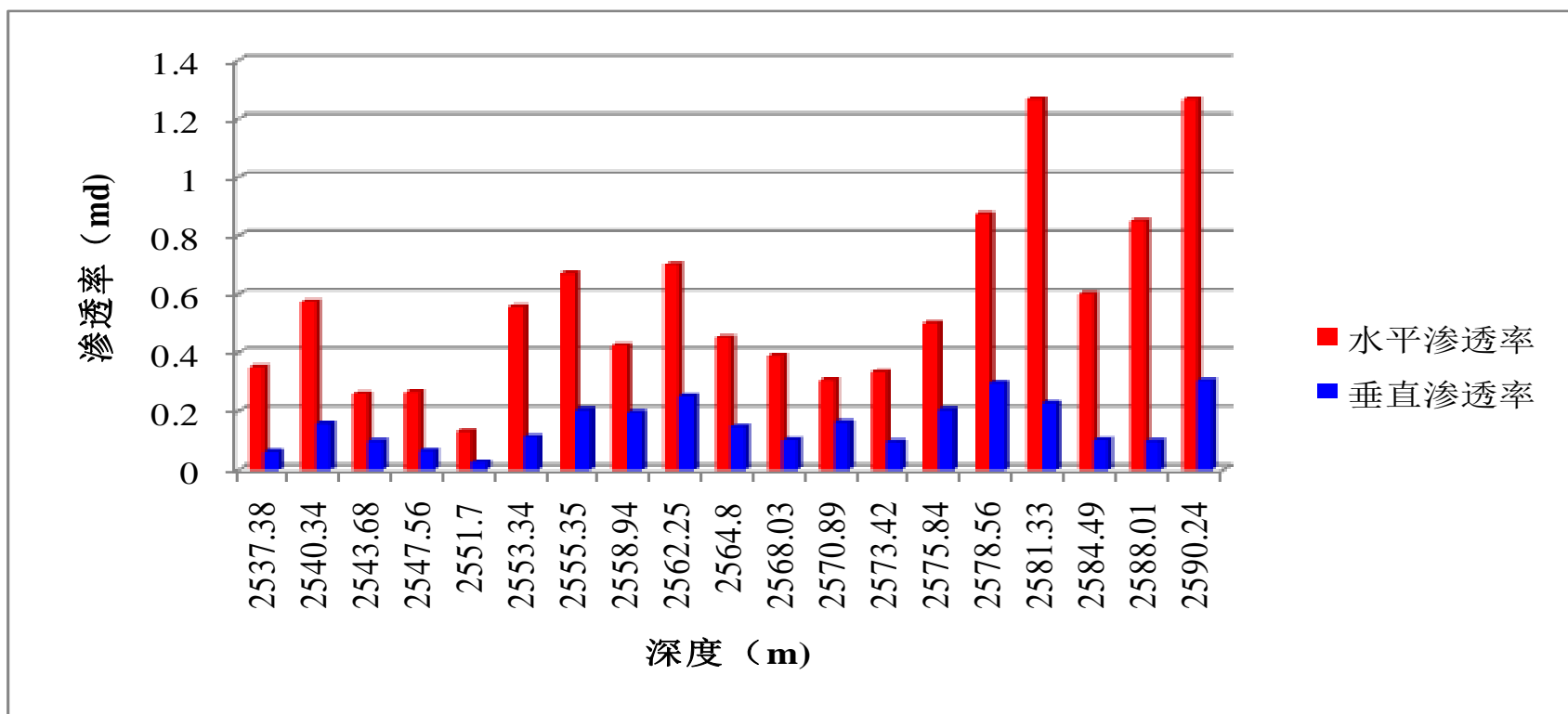


横向上对比性强，都表现出明显的三分性，二亚段孔隙度略低。



6、水平渗透率远高于垂直渗透率

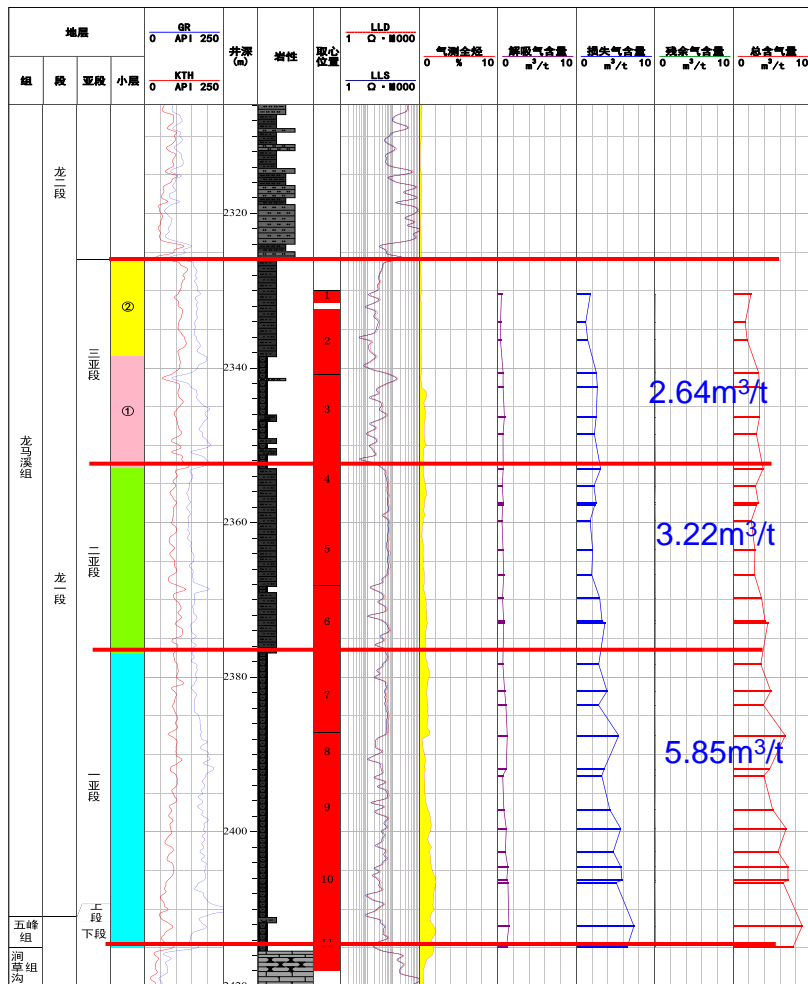
水平渗透率平均为0.5678md，垂直渗透率平均为0.1539md。水平缝发育是水平渗透率高的主要原因。



焦页4井相同深度全直径实测水平与垂直渗透率统计对比图

(六) 含气量特征

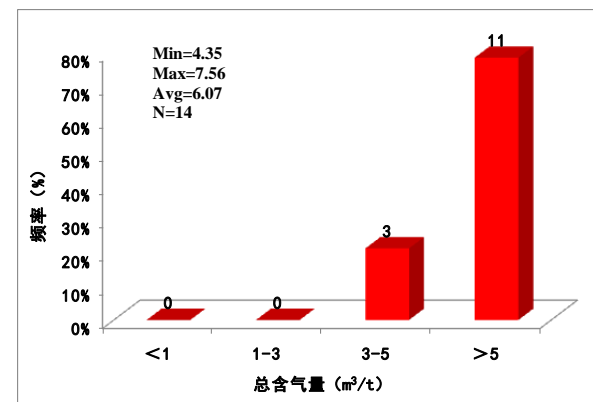
1、从上向下含气量增高



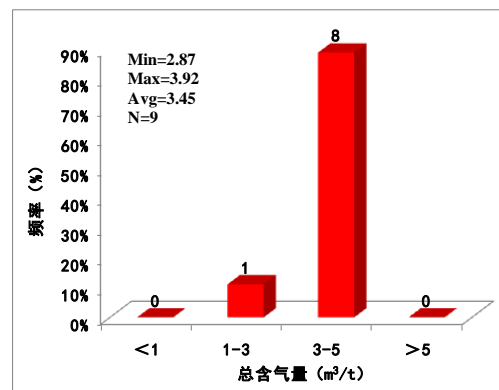
焦页1井含气量综合柱状图

下部一亚段含气量高，平均 $5.85\text{m}^3/\text{t}$ 。中、上部二、三亚段平均含气量分别为 3.22 、 $2.64\text{m}^3/\text{t}$ 。

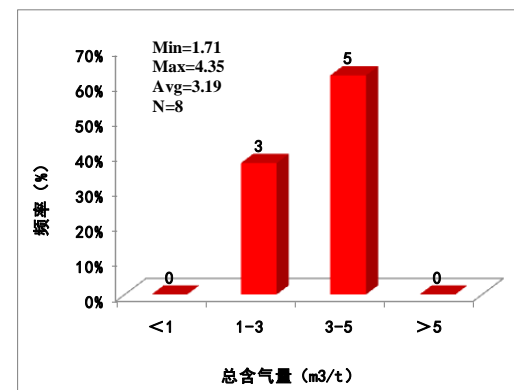
I 亚段



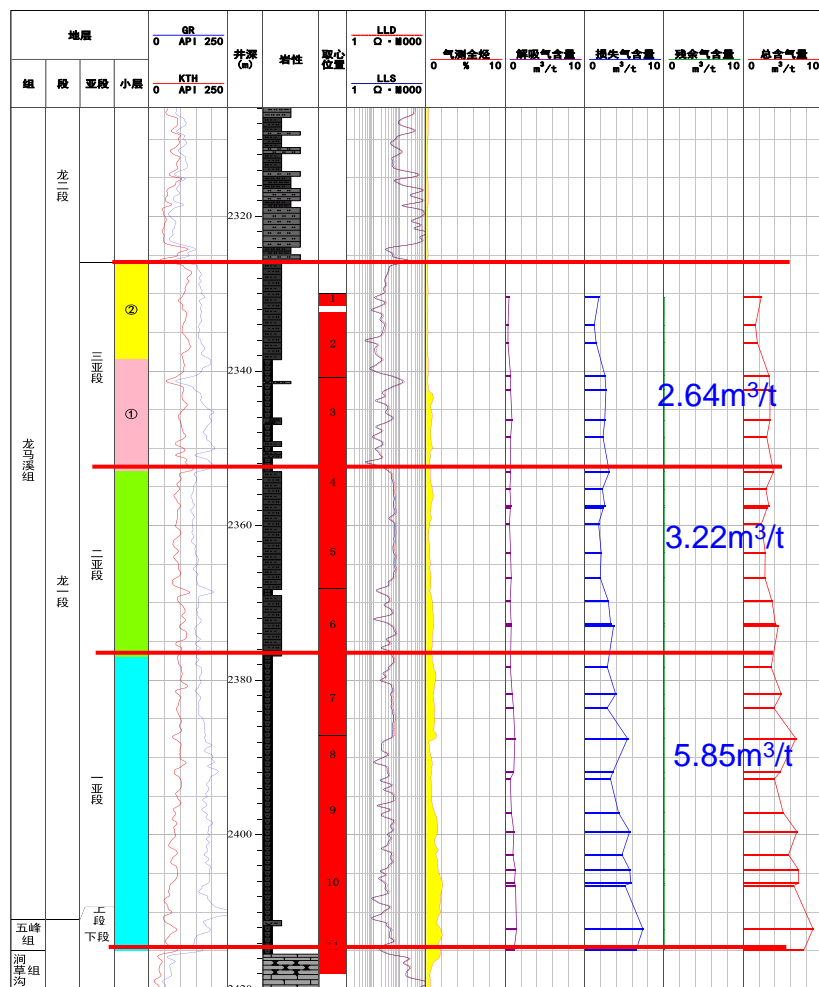
II 亚段



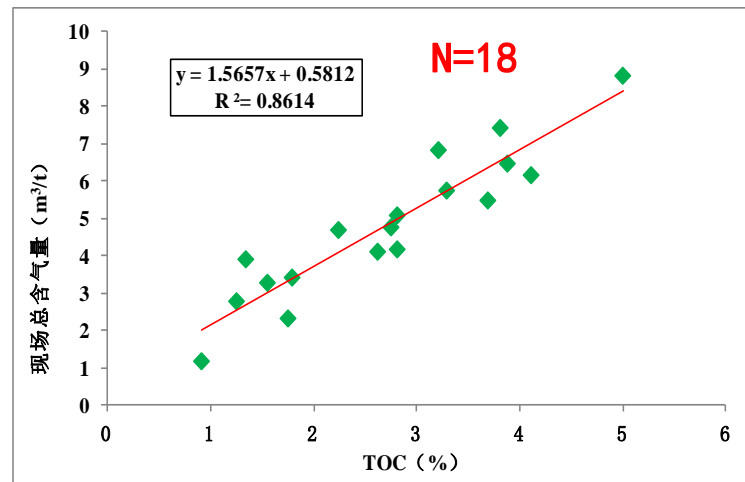
III 亚段



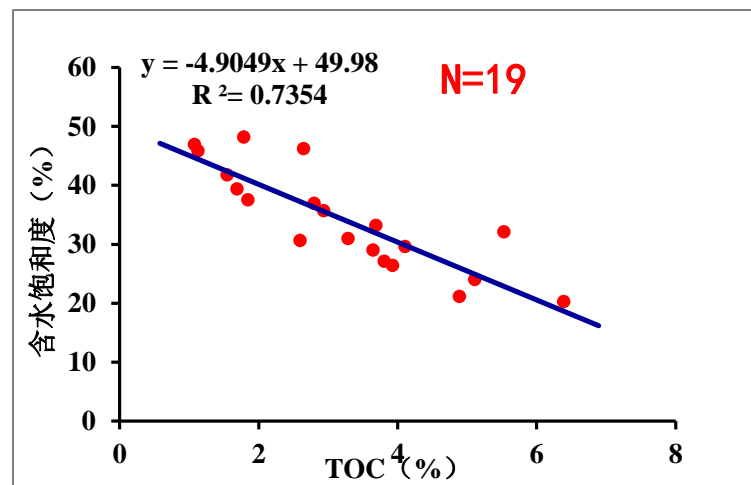
有机质孔具有亲油（气）性、疏水性，表现为与含气量呈明显正向关、与含水饱和度呈明显负相关，深水陆棚含气量高。



焦页1井含气量综合柱状图



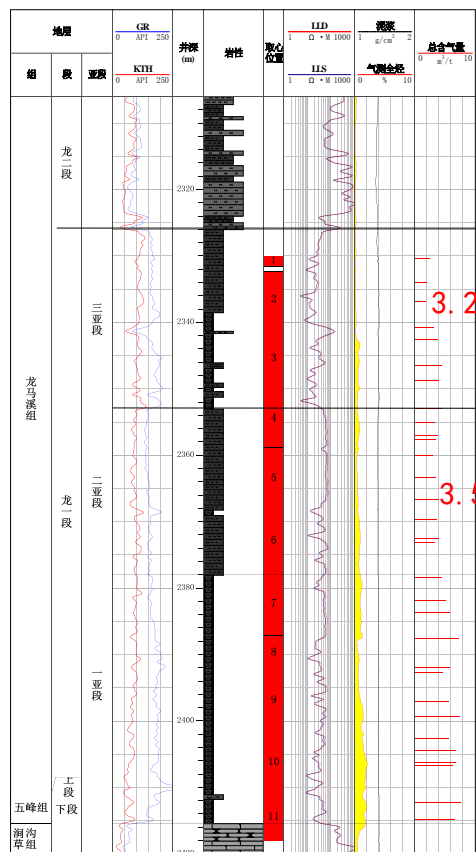
焦页1井TOC与总含气量关系图



焦页1井TOC与含水饱和度关系图

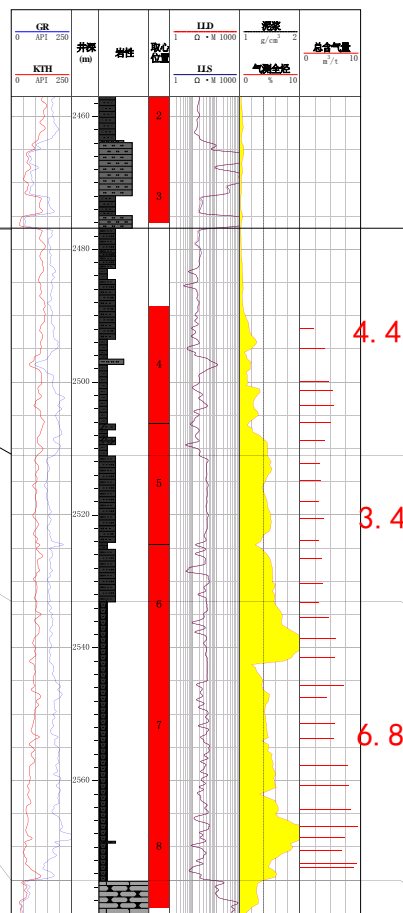
焦页1、2、3、4井含气量纵向变化具有相似的特征。横向可对比性好。

焦页1井



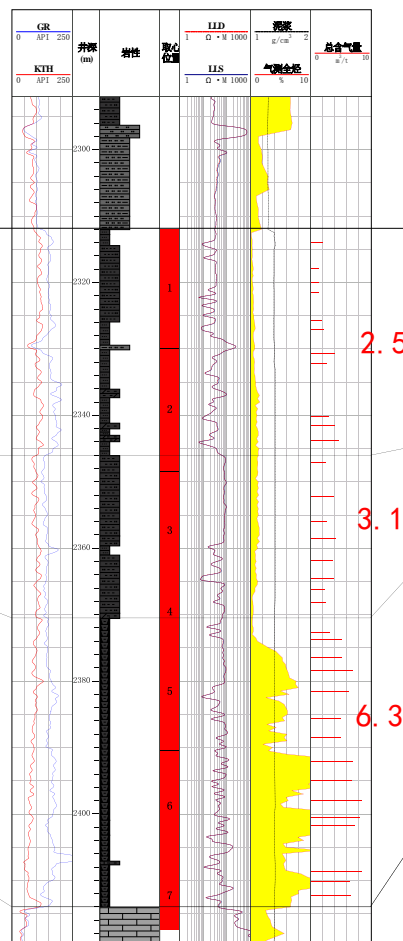
平均4.6m³/t

焦页2井



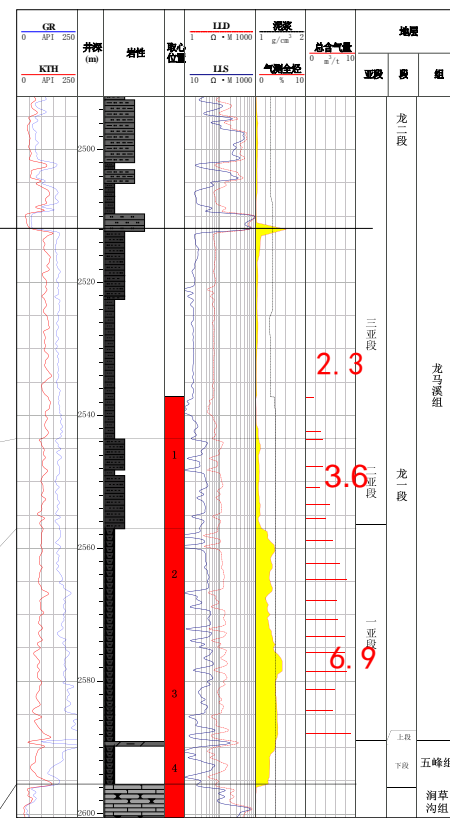
平均5.4m³/t

焦页3井



平均4.3m³/t

焦页4井

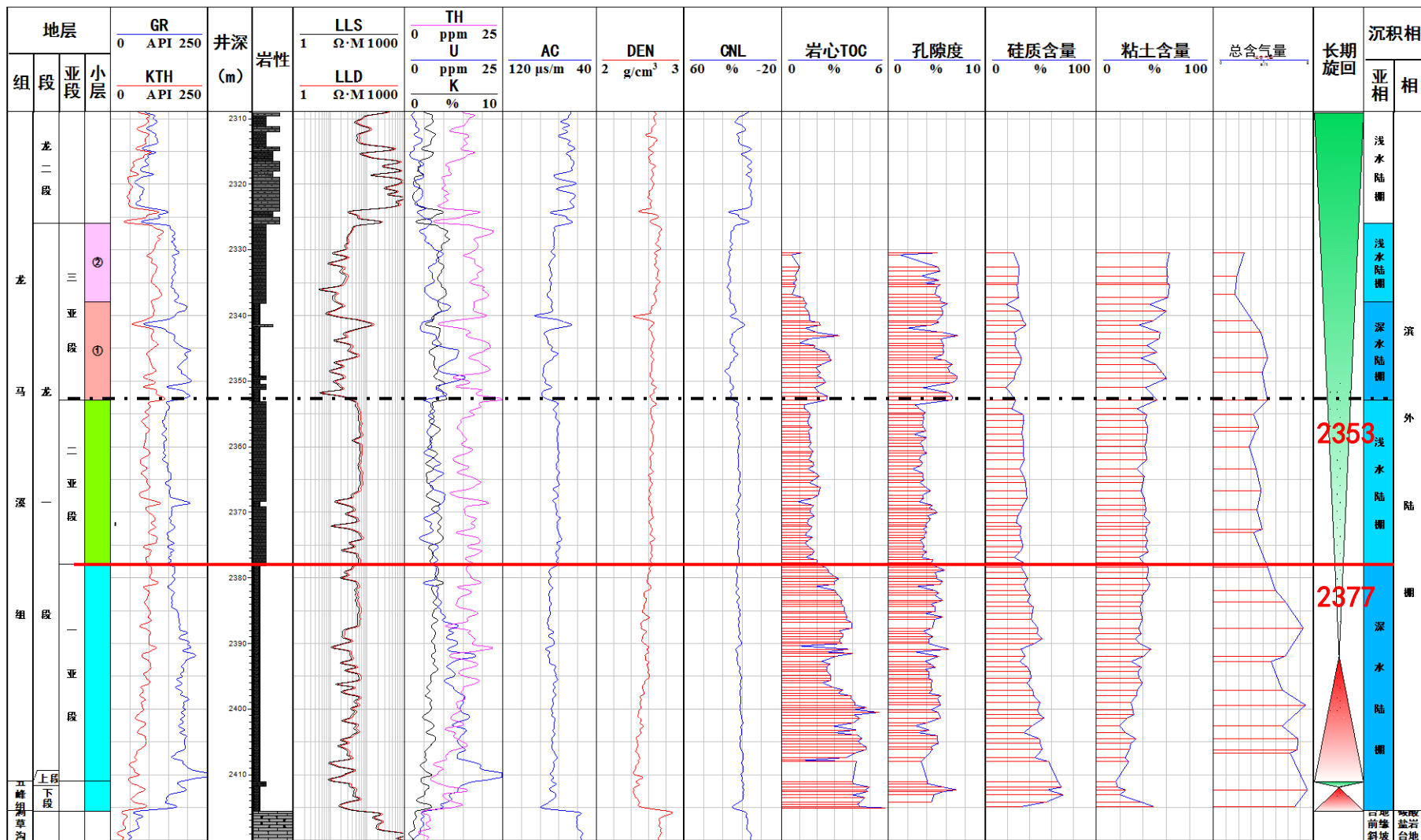


平均5.5m³/t

(七) 页岩气层段综合评价

下部一亚段为优质页岩气层段。具有“高TOC、高孔隙度、高含气量、高硅质含量”的“四高”特征，且从上向下呈增高趋势

焦页1井龙马溪组综合评价图



(八) 涪陵页岩气田为大型优质页岩气田

1、为优质天然气

气体以甲烷为主（平均含量98.204%），为不含硫化氢的优质天然气干气气藏。

焦石坝地区五峰组-龙马溪组一段测试产量表

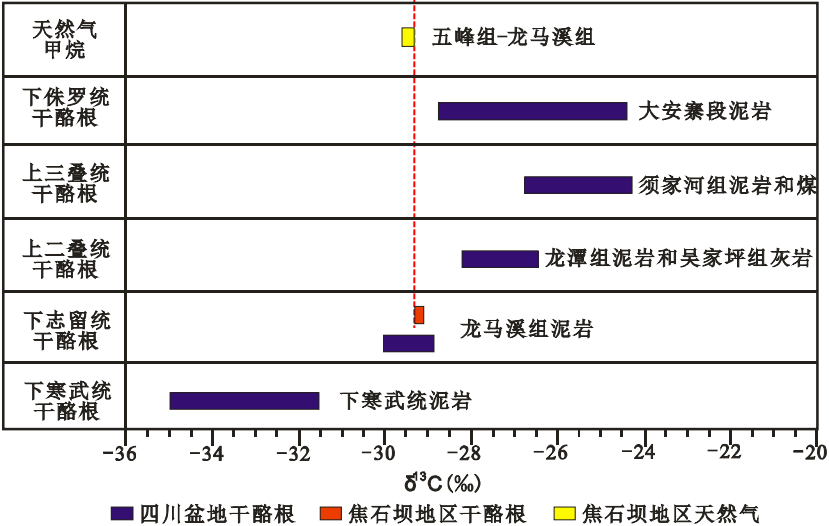
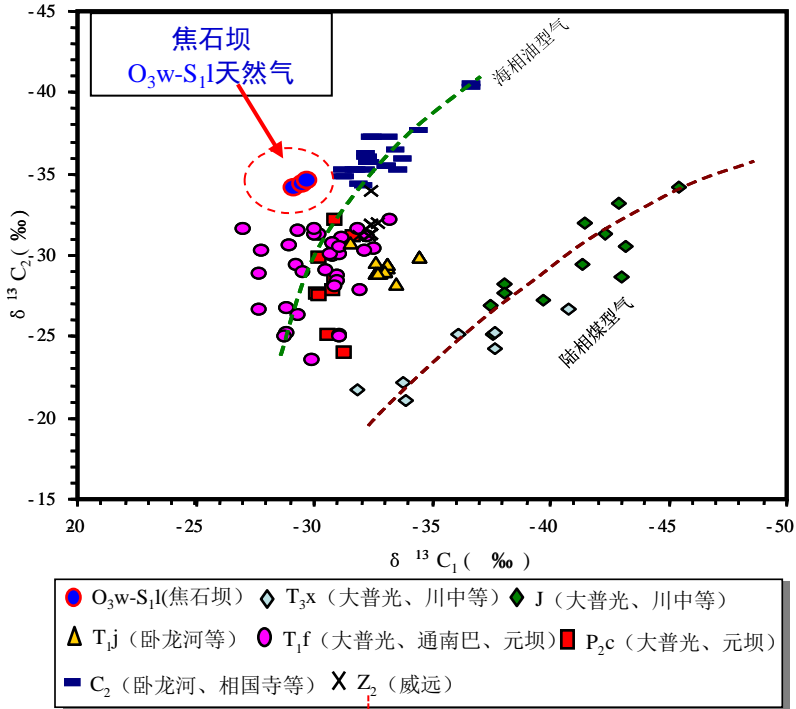
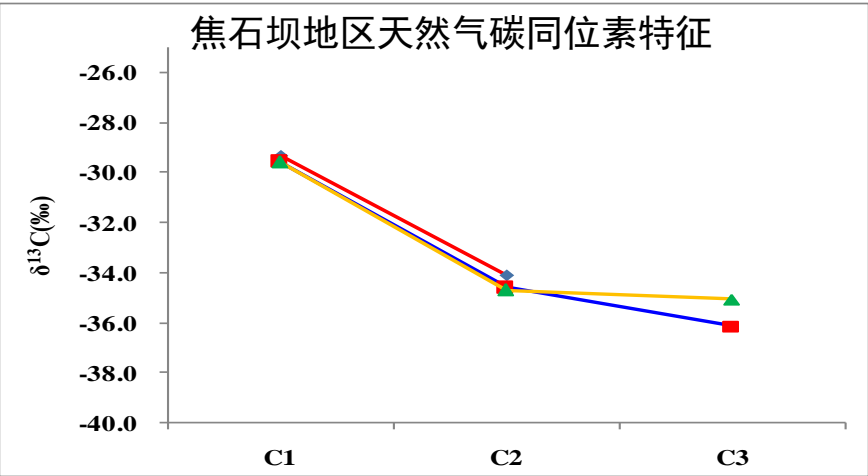
井号	层位	取样深度 m	相对 密度	天 然 气 组 分 (%)										临界 温度 (K)	临界 压力 (MPa)
				甲 烷	乙 烷	丙 烷	丁 烷	氢	氦	氧	氮	二 氧 化 碳	硫 化 氢		
焦页 1HF 井	五峰组 - 龙马溪 组一段	2646.09- 3653.99	0.563	98.260	0.680	0.020	0	0.003	0.037	0	0.820	0.180	0	191.1	4.634
			0.564	98.220	0.680	0.020	0	0.003	0.037	0	0.820	0.220	0	191.2	4.635
			0.564	98.230	0.690	0.020	0	0.006	0.037	0	0.820	0.200	0	191.2	4.634
			0.564	98.210	0.680	0.020	0	0.002	0.037	0	0.830	0.220	0	191.2	4.635
			0.566	98.097	0.585	0.232	0.028	0	0.037	0	0.816	0.196	0	191.4	4.598
			/	98.097	0.585	0.232	0.028	0	0.037	0	0.816	0.196	0	/	/
			/	98.260	0.570	0.030	0	0	0.050	0	0.870	0.190	0	/	/
			/	97.774	0.792	0.225	0.042	0	0.042	0	0.885	0.175	0	/	/
			/	97.930	0.683	0.022	0.005	0	0.030	0	0.867	0.428	0	/	/
			/	98.322	0.693	0.020	0.001	0	0.033	0	0.827	0.101	0	/	/
			/	98.322	0.693	0.020	0.001	0	0.033	0	0.827	0	0	/	/
			/	98.341	0.673	0.019	0.001	0	0.034	0	0.818	0	0	/	/
焦页 3HF 井	五峰组 - 龙马溪 组一段	2769.00- 3770.00	/	98.34	0.68	0.02	0.001	0	0.032	0	0.840	0.100	0	/	/
			/	98.34	0.66	0.02	0.004	0	0.034	0	0.810	0.120	0	/	/
			0.563	98.26	0.734	0.024	0.004	0	0.033	0	0.806	0.13	0	191	4.6
			0.563	98.23	0.706	0.026	0.007	0	0.033	0	0.861	0.124	0	191	4.6
			0.564	98.23	0.723	0.032	0.013	0	0.034	0	0.819	0.127	0	191.1	4.6

2、为同源不同期混合气

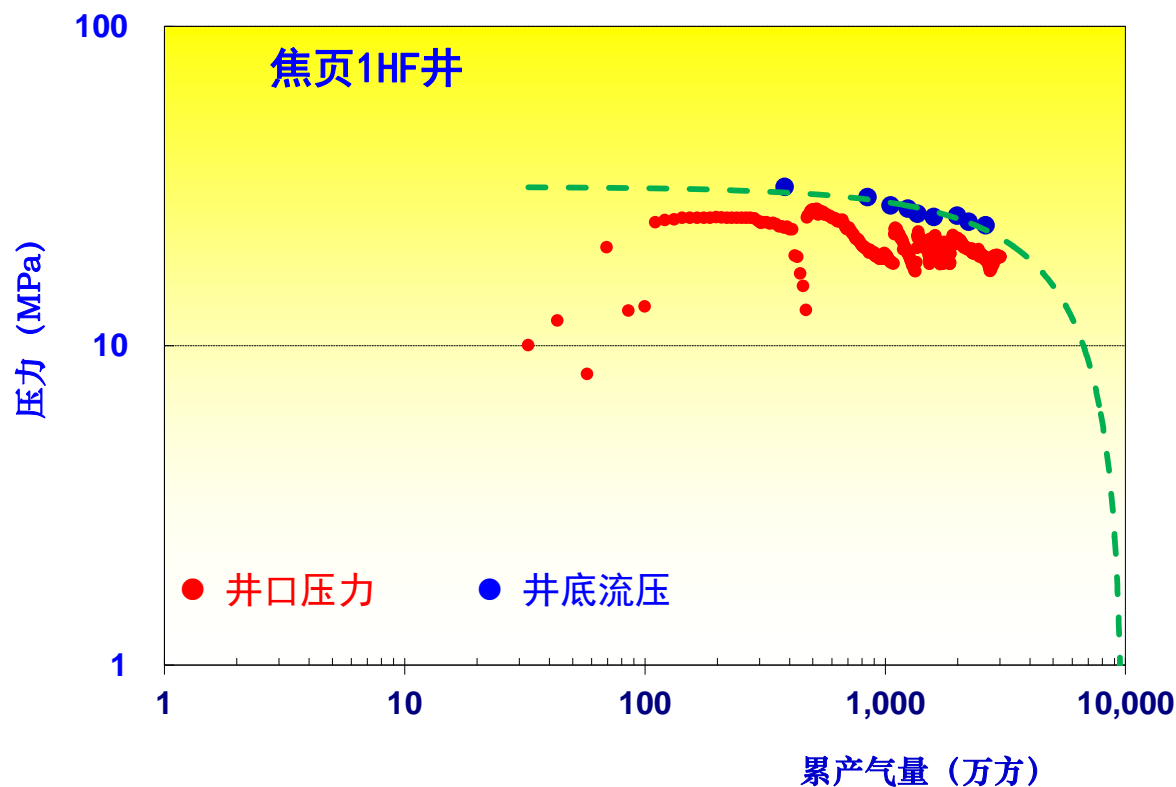
◆为油型气，与四川盆地上古生界天然气及陆相天然气在组分上差异明显。

◆碳同位素对比表明，页岩气来源于五峰组-龙马溪组烃源岩，为自生自储。

◆碳同位素倒转表明，页岩气主要为同源不同期混合气。



3、低温超压



目的层地层温度82摄氏度；计算地温梯度为2.73摄氏度/100米。

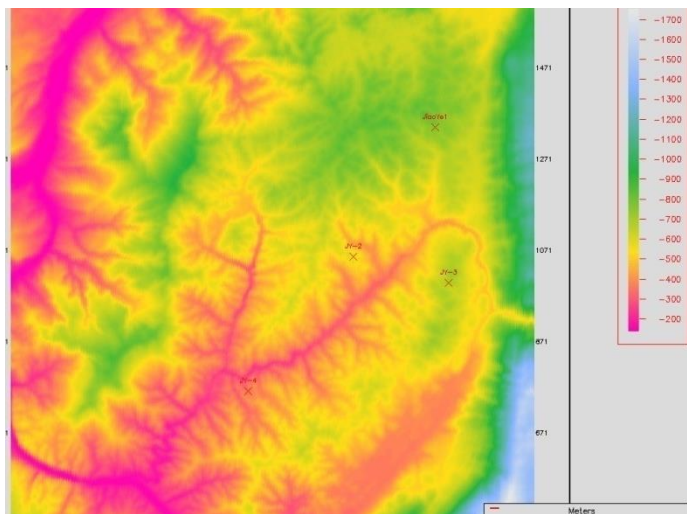
利用产能测试和变流量试井理论，计算焦页1HF、1-3HF井地层压力37.69兆帕，压力系数为1.55。

4、气层埋深适中

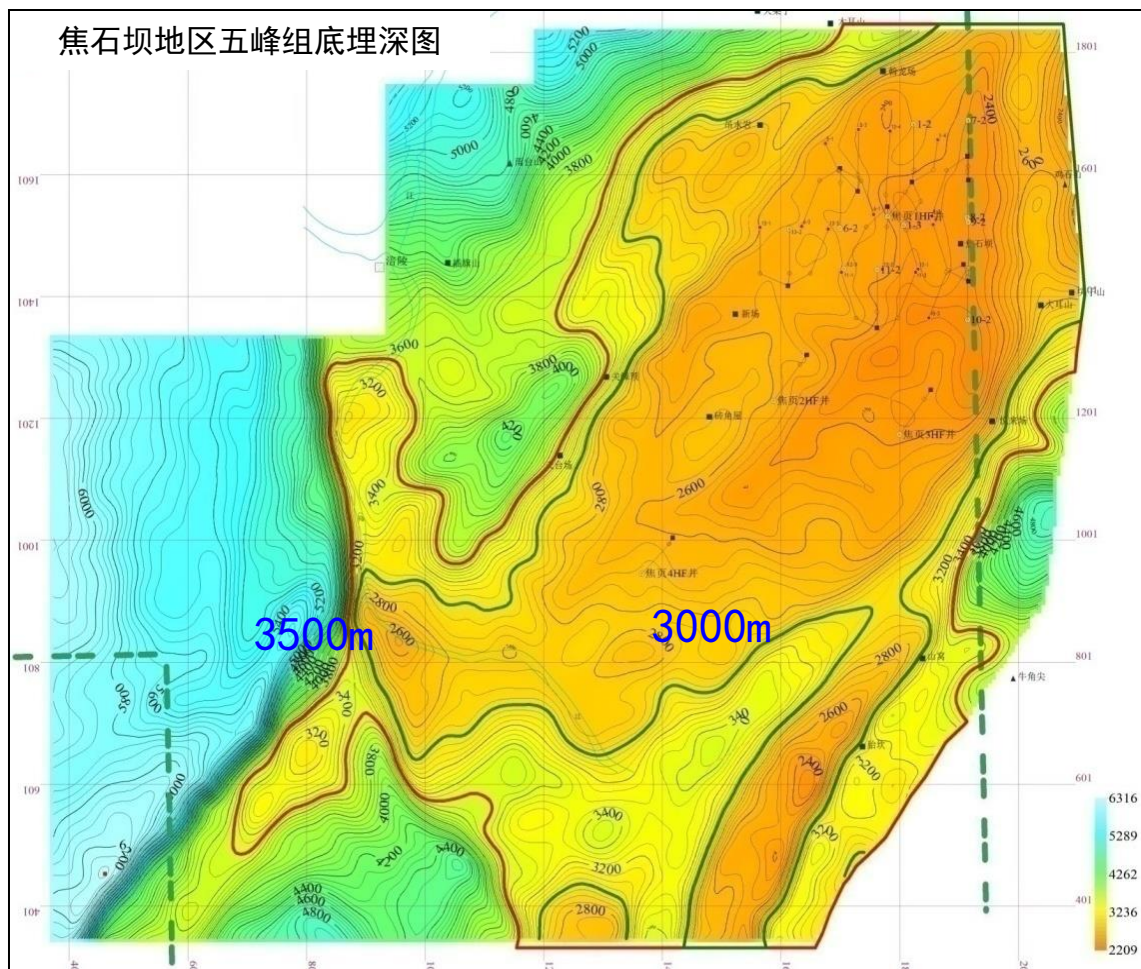
焦石坝构造主体区页岩

气层底埋深**2250—3500m**。

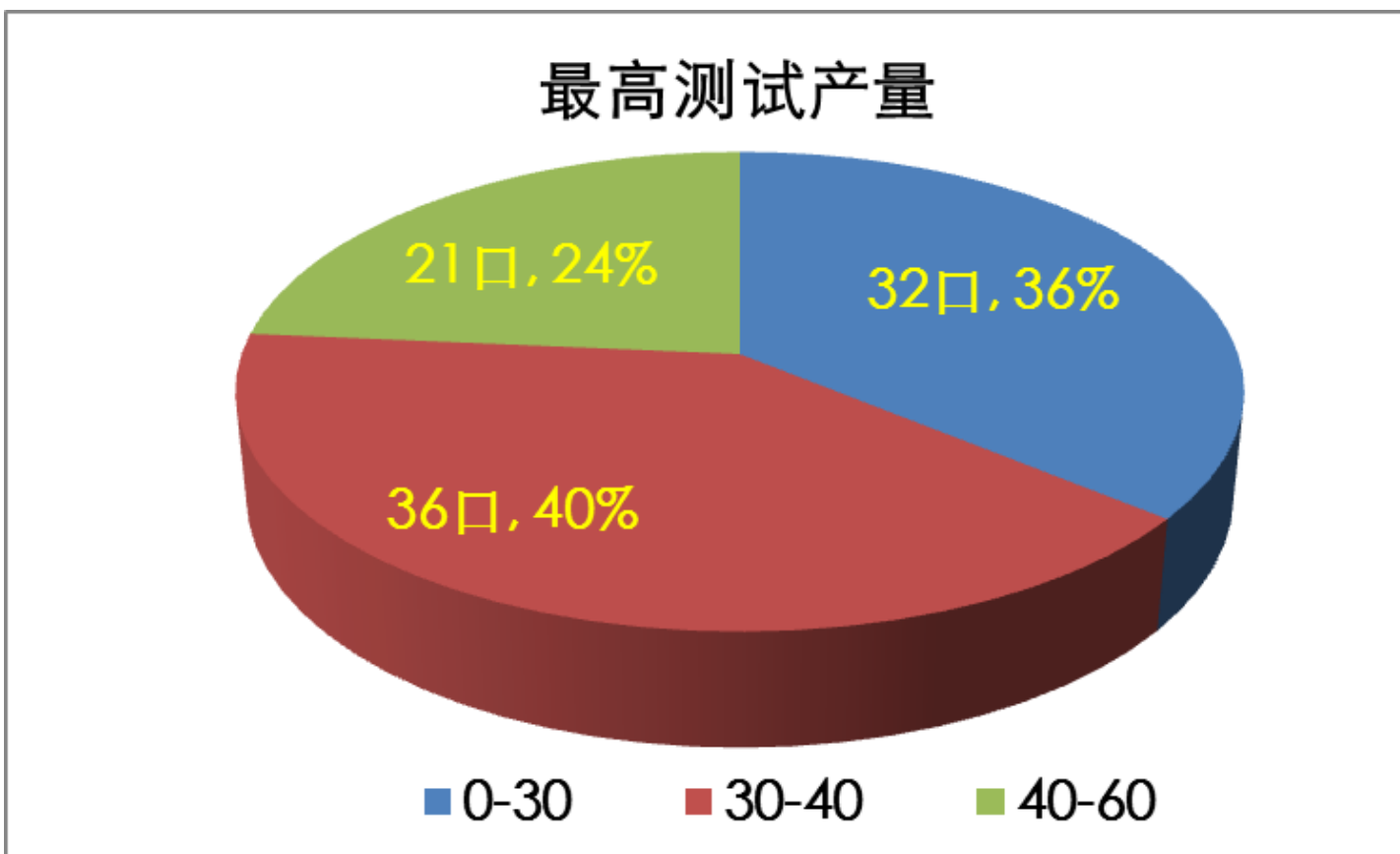
地表海拔高程图



(据Google高程数据库, 625个数据点/平方千米)

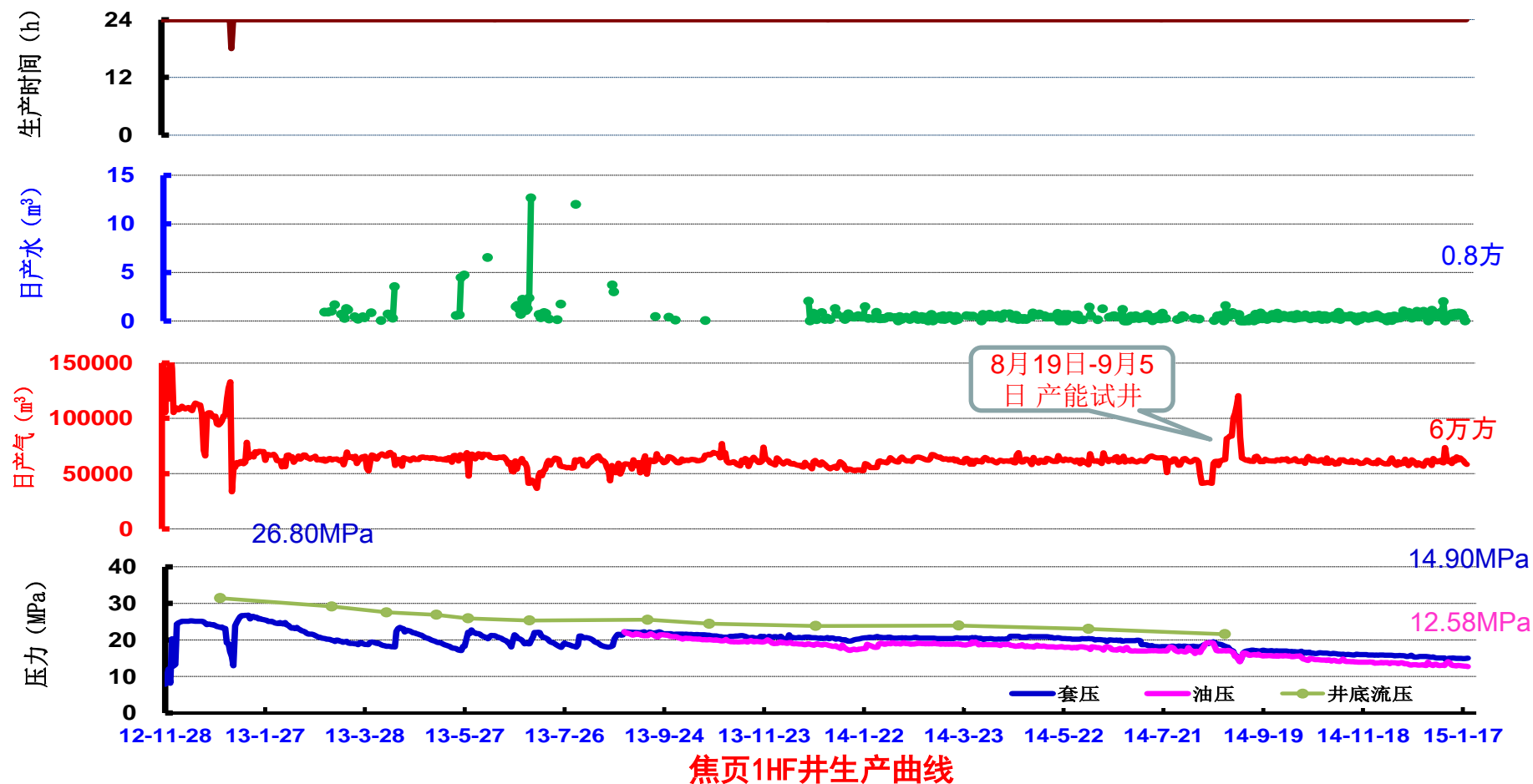


5、气井产量高

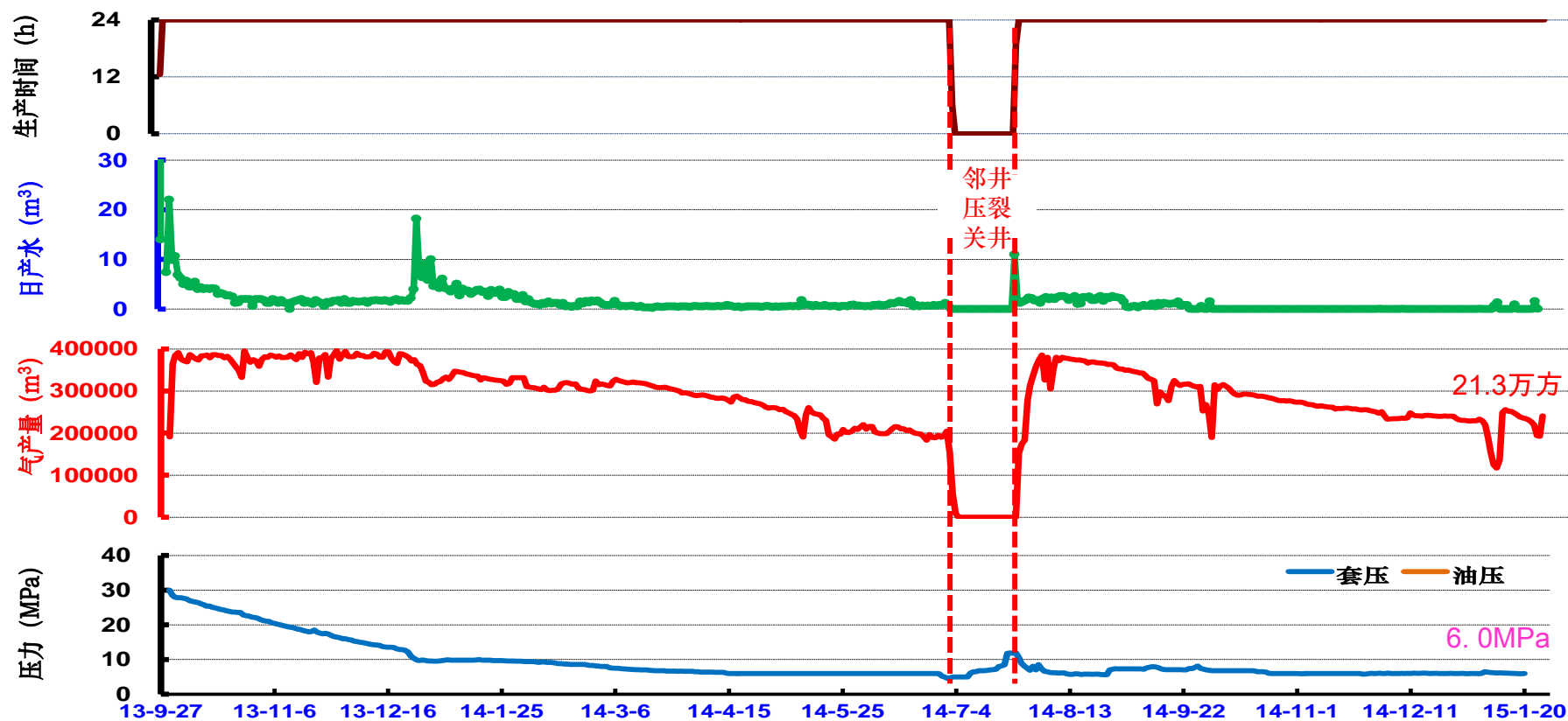


压裂试气89口井平均单井测试产量32.55万方/天，最高测试产量59.11万方/天。

6、试采效果好



2012年11月28日投入试采，2013年1月9日按6万方/天配产，先期采用CNG生产，9月15日开始管输生产。已经连续生产794天，日产气量保持在6万方/天左右，截止2015年1月31日井口油压12.58MPa，套压14.90MPa，累产气5097万方，累产水215m³。



焦页6-2HF井生产曲线

2013年9月30日投入试采（管输生产），初期配产36万方/天大压差生产，已连续生产491天，2014年4月15日压力降至6.0MPa，后因邻井压裂压力回升至11.8MPa，截止2015年1月31日井口套压6.0MPa，日产气21.3万方，累计产气13771万方，累产水627.9方。

提 纲

一、涪陵页岩气田发现

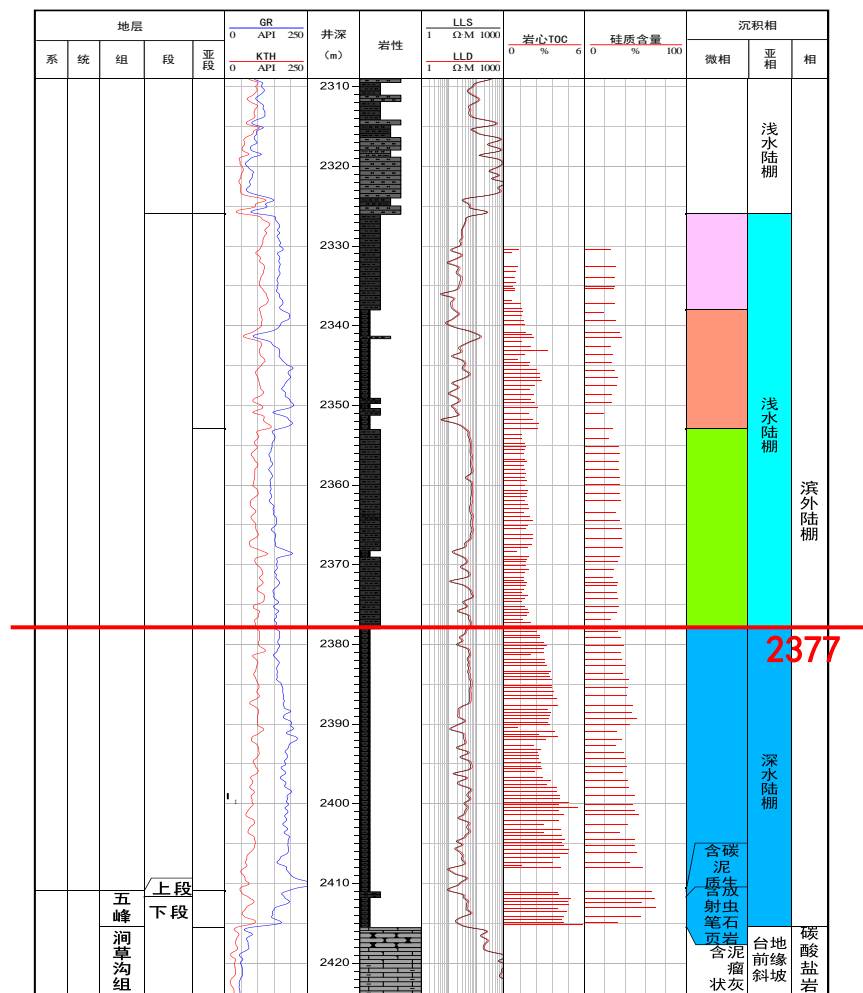
二、涪陵页岩气田特征

三、勘探理论与技术进展

(一) 提出了海相页岩气“二元”富集理论，指导了选区评价和涪陵页岩气田发现

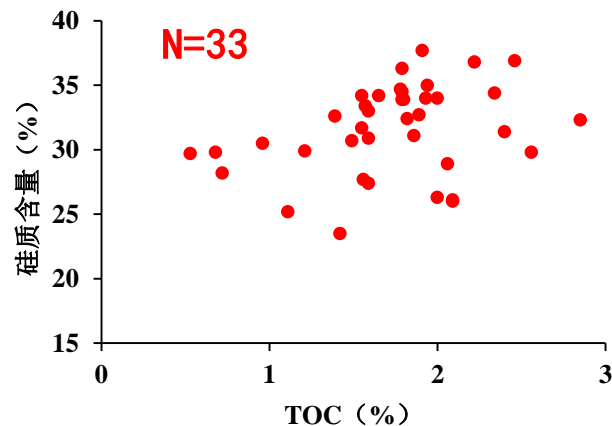
海相页岩气“二元”富集理论：深水陆棚优质页岩是海相页岩气形成富集的基础；良好的保存条件是海相页岩气富集高产的关键。

1、深水陆棚优质页岩是海相页岩气形成富集的基础

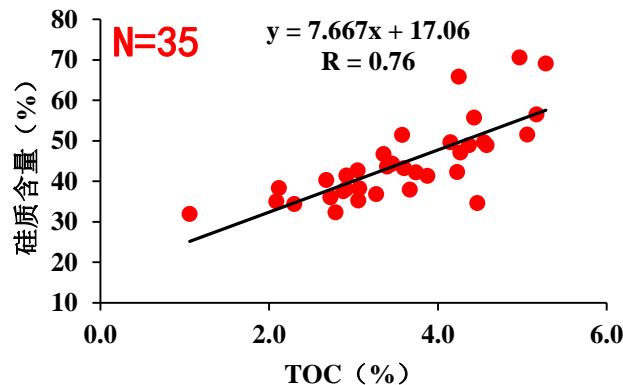


焦页1井五峰-龙马溪组TOC和硅质含量综合评价图

◆深水陆棚是优质页岩发育的有利相带，具有高TOC及高硅质含量特征，且表现出良好正相关耦合规律



浅水陆棚 (2330m-2377m) TOC、硅质含量相关性图

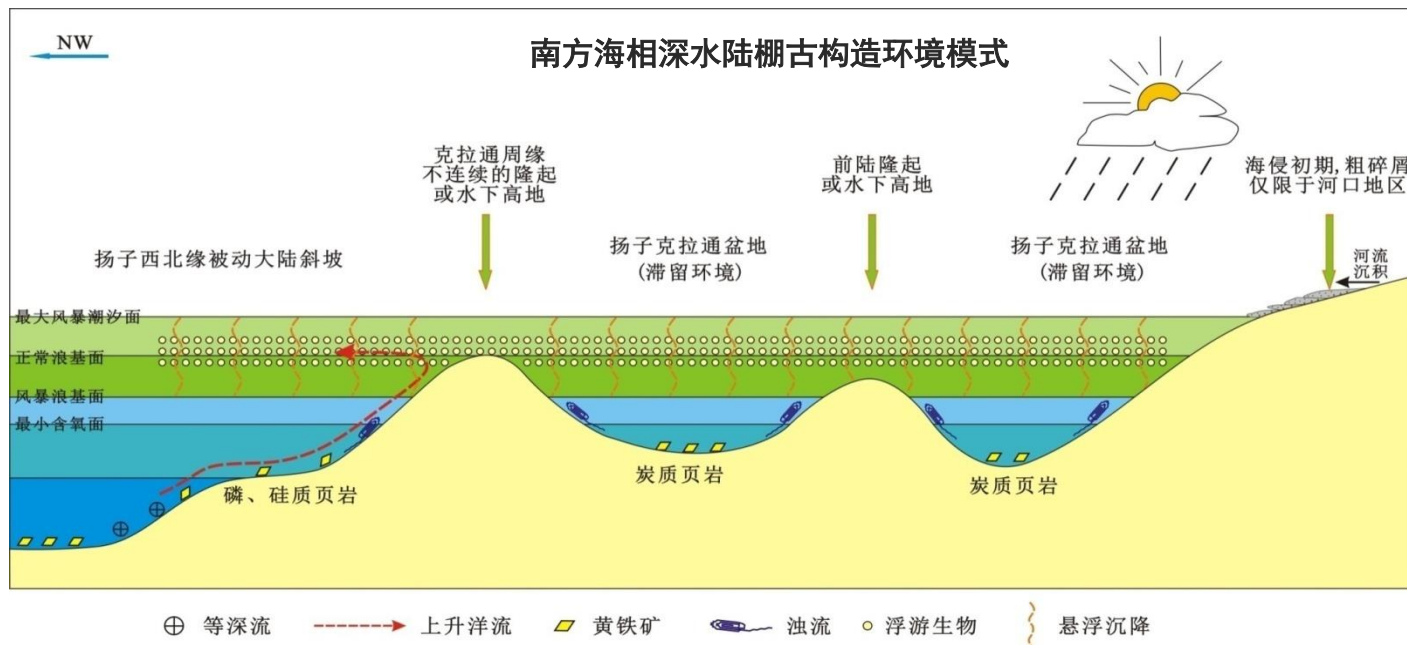
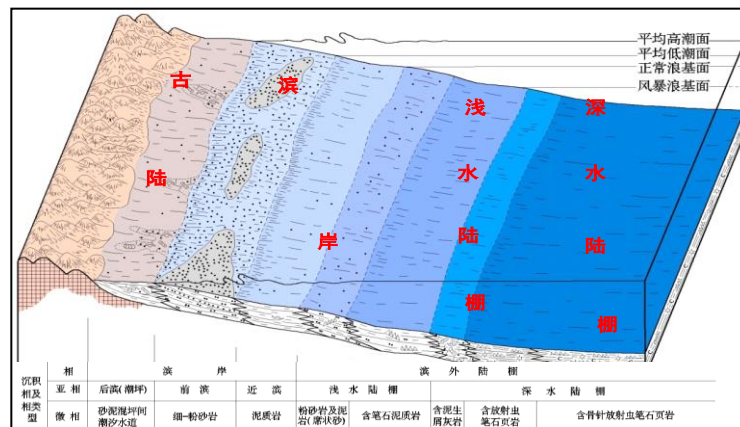


深水陆棚 (2377m-2415m) TOC、硅质含量相关性图

◆深水陆棚高TOC、高硅质良好耦合的成因模式

深水陆棚浮游生物繁盛，且为强还原沉积环境，有利于有机质的聚集和保存。

四川盆地及周缘晚奥陶世五峰期至志留纪沉积相模式图



牛蹄塘组：

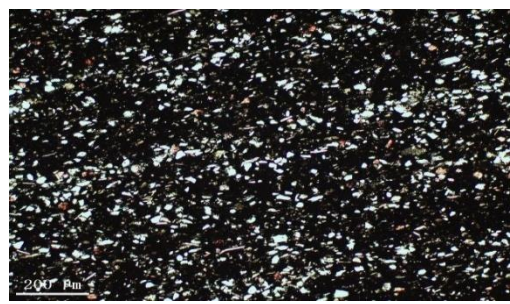
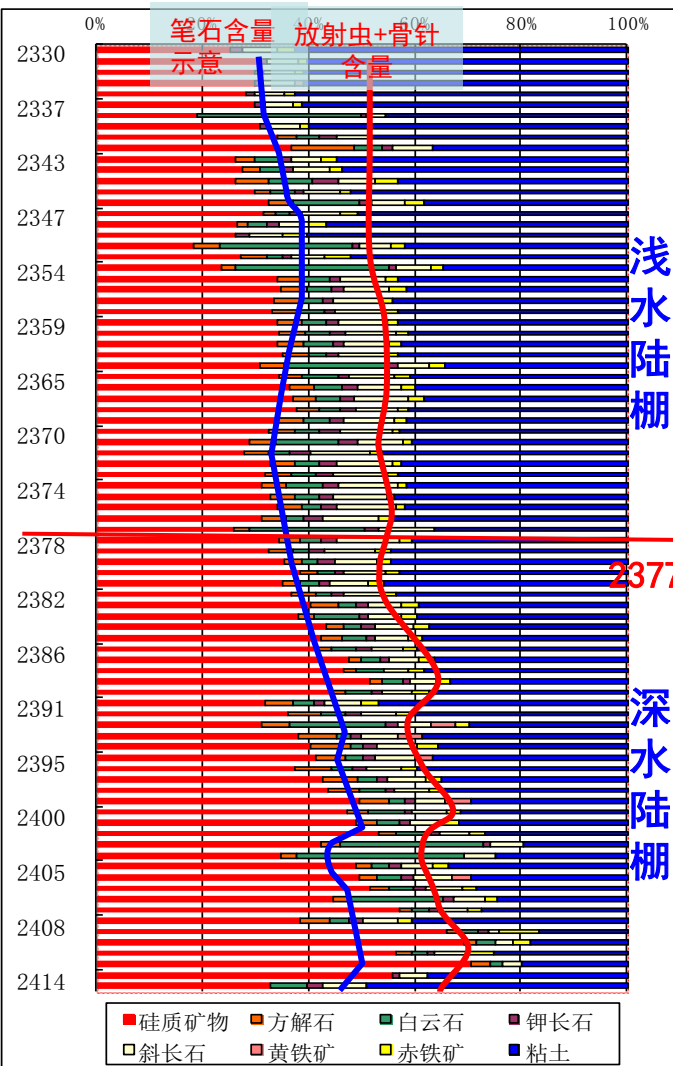
被动大陆边缘深水陆棚

五峰组-龙马溪组：

克拉通内坳陷深水陆棚

深水陆棚硅质以内生为主，主要为生物、生物化学成因；浅水陆棚硅质以陆源输入为主。

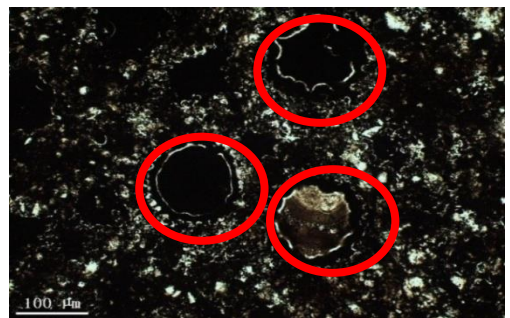
焦页1井页岩矿物含量与生物含量关系图



浅水陆棚陆源输入石英



浅水陆棚陆源输入石英



含放射虫碳质笔石页岩，见大量放射虫

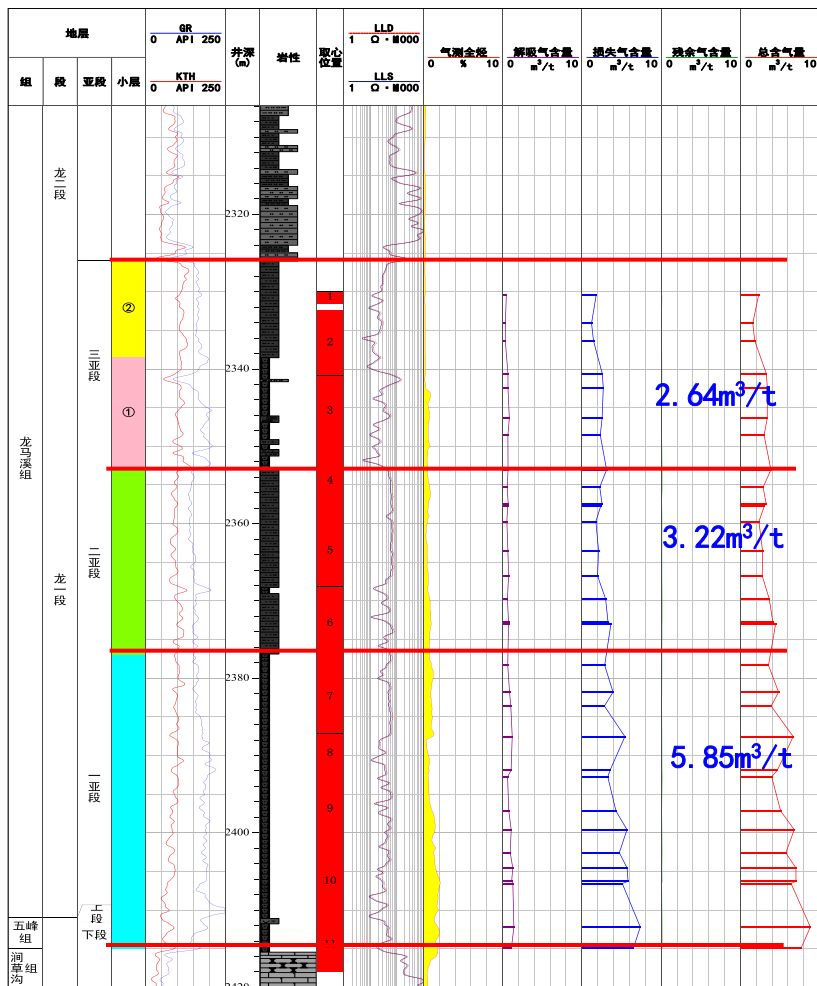


含放射虫碳质笔石页岩，见硅质骨针

◆深水陆棚优质页岩表现为高含气量、良好压裂品质的特征

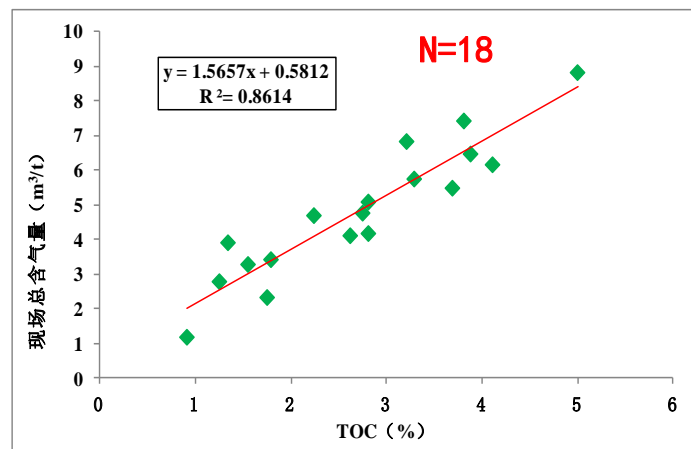
高TOC，为页岩气形成提供了良好的生烃基础；也是有机孔发育的基础；随着TOC增加高，含气量增高。

高硅质含量，是页岩可压性良好的基础。

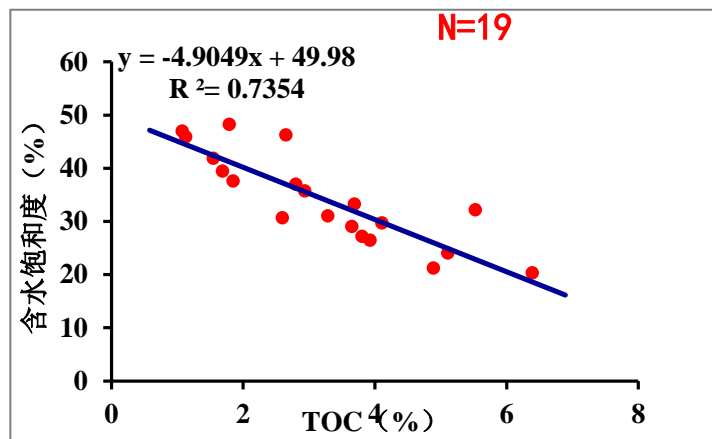


焦页1井含气量综合柱状图

含气量与TOC相关性好



焦页1井TOC与总含气量关系图



焦页1井TOC与含水饱和度关系图

2、良好的保存条件是海相页岩气富集高产的关键

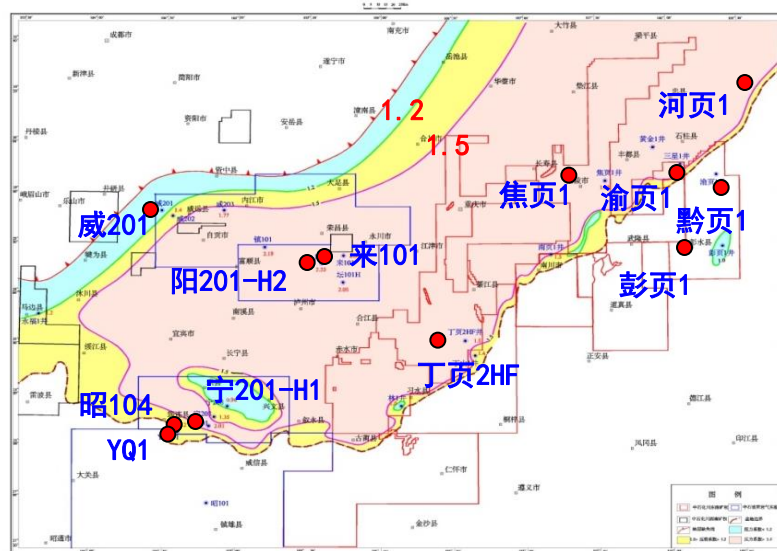
◆气产量与压力系数呈正相关关系

钻井揭示，压力系数大于1.2、高压或超高压是单井高产、高效的重要特征。

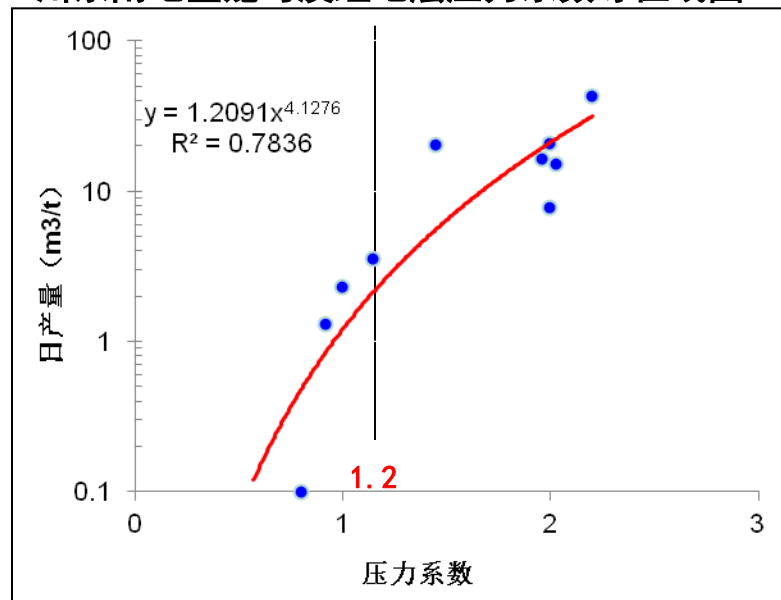
盆内以高压、超高压为主；盆外以低压-常压为主。

压力系数是保存条件的综合性判别指标。盆内总体保存条件好；盆外总体保存条件复杂。

四川盆地及周缘龙马溪组钻井与地层压力系数相关关系图



川东南地区龙马溪组地层压力系数等值线图

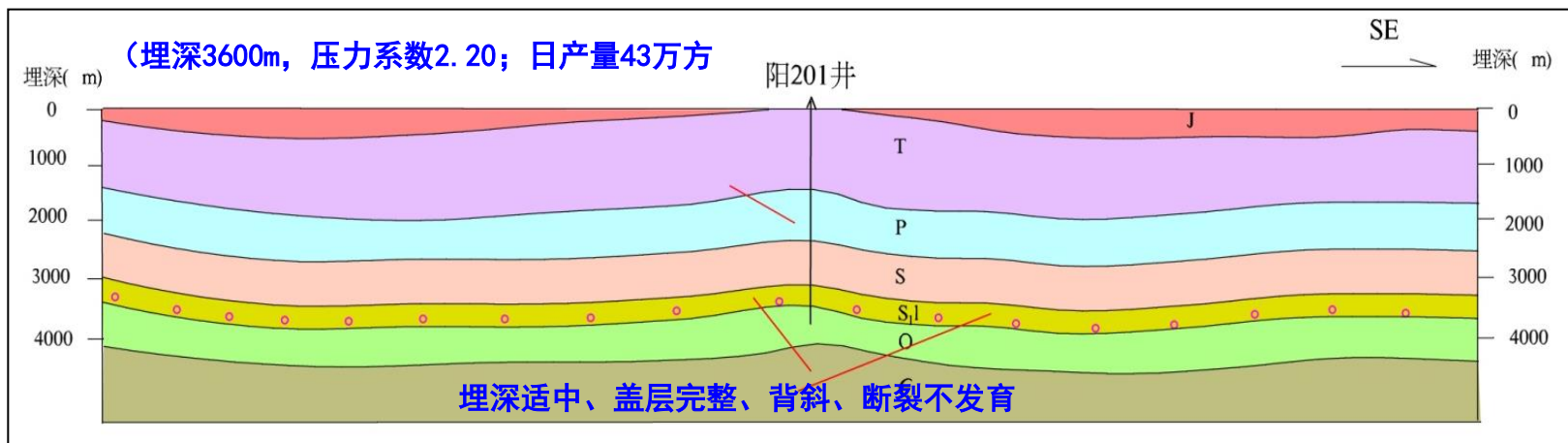
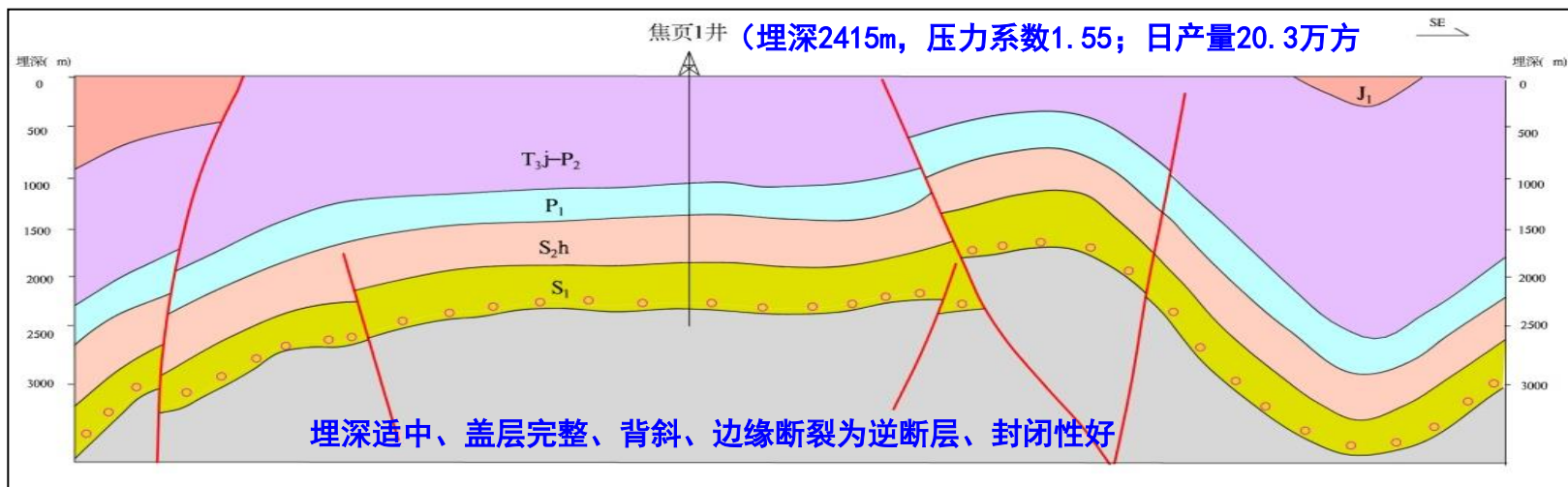


构造位置	井号	气产量 (万方/天)	压力系数	气组分	保存条件评价
盆内	焦页1HF	20.3	1.45	CH ₄	好
	威201-H1	1.31	0.92	CH ₄	好
	威204	16.5	1.96	CH ₄	好
	宁201-H1	14-15	2.03	CH ₄	好
	长宁H3-1	7.68	2	CH ₄	好
	阳201-H2	43	2.2	CH ₄	好
	YSH1-1	3.56	1.15	CH ₄	好
	YS108H1-1	20.68	2	CH ₄	好
盆缘	彭页1井	2.3	0.9-1.0	CH ₄	好
	昭101井	微含气	0.8	N ₂ 、CO ₂	差
	渝页1井	微含气		N ₂ 、CO ₂	差

◆分析了页岩气保存条件主控因素

影响页岩气保存条件的地质因素主要是顶底板条件和构造作用，顶底板条件是基础，构造作用是关键。

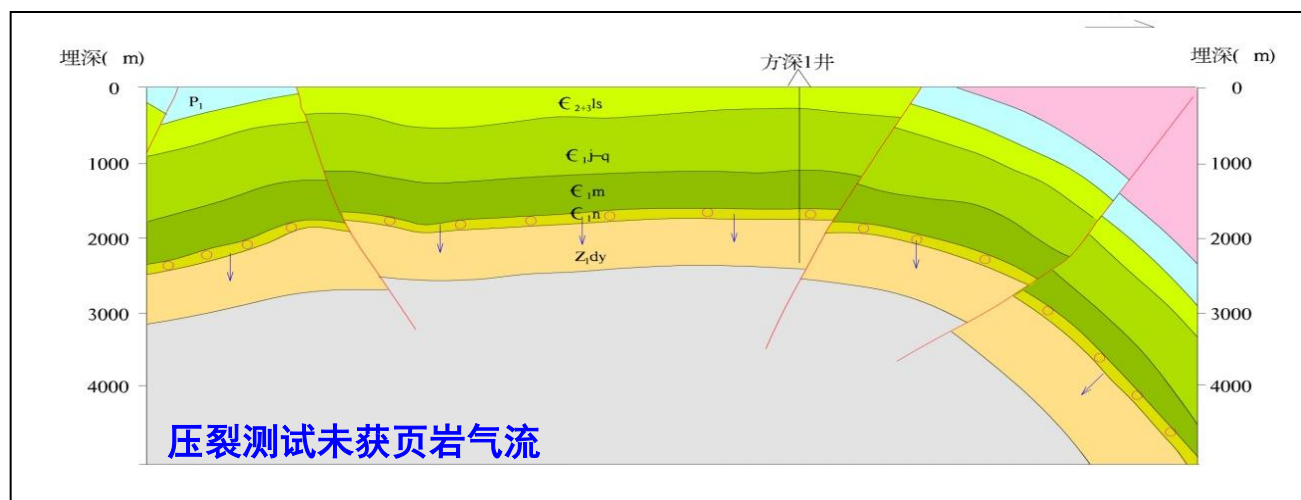
良好的顶底板条件、适中的埋深、远离开启断裂、远离抬升剥蚀区、远离缺失区、构造样式良好、逸散破坏时间短的地区，具有良好的页岩气保存条件。



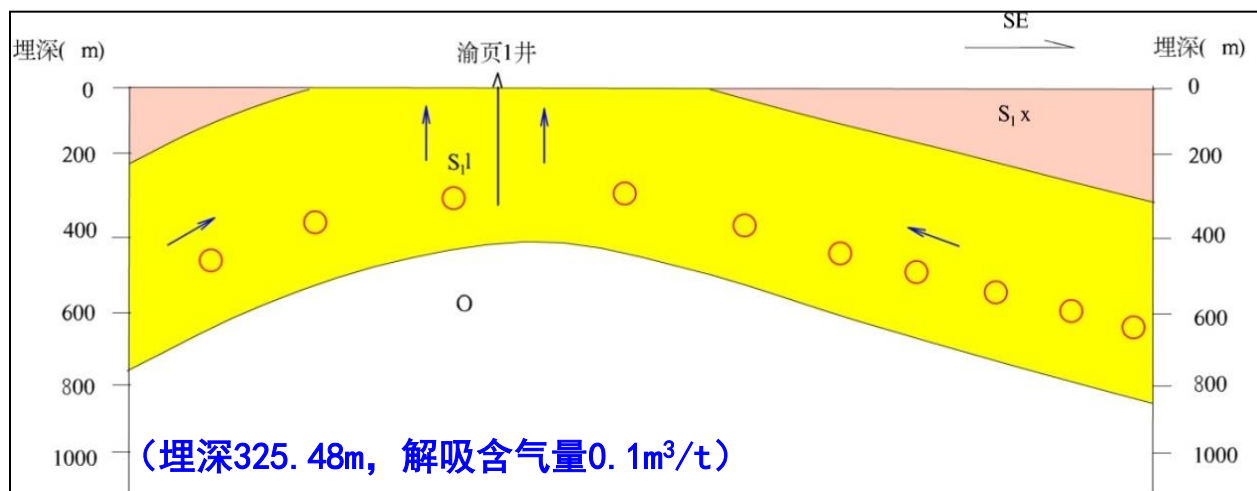
◆建立了5种页岩气逸散破坏模型

模型1：底板条件差，页岩气向下逸散

桐湾运动造成局部地区发育不整合面，下寒武统页岩气层底板条件较差。



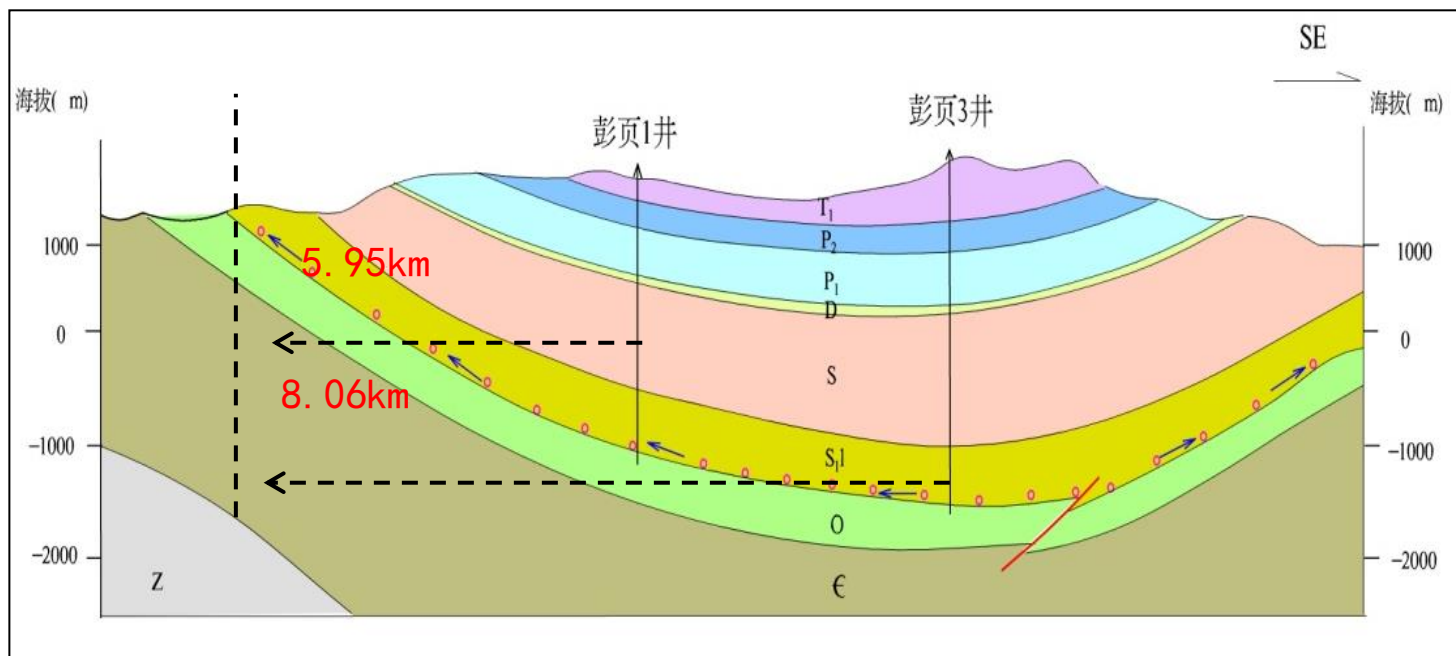
模型2：目的层埋藏浅，顶板条件差，页岩气向上逸散



模型3：靠近露头剥蚀区，页岩气侧向扩散或渗流散失

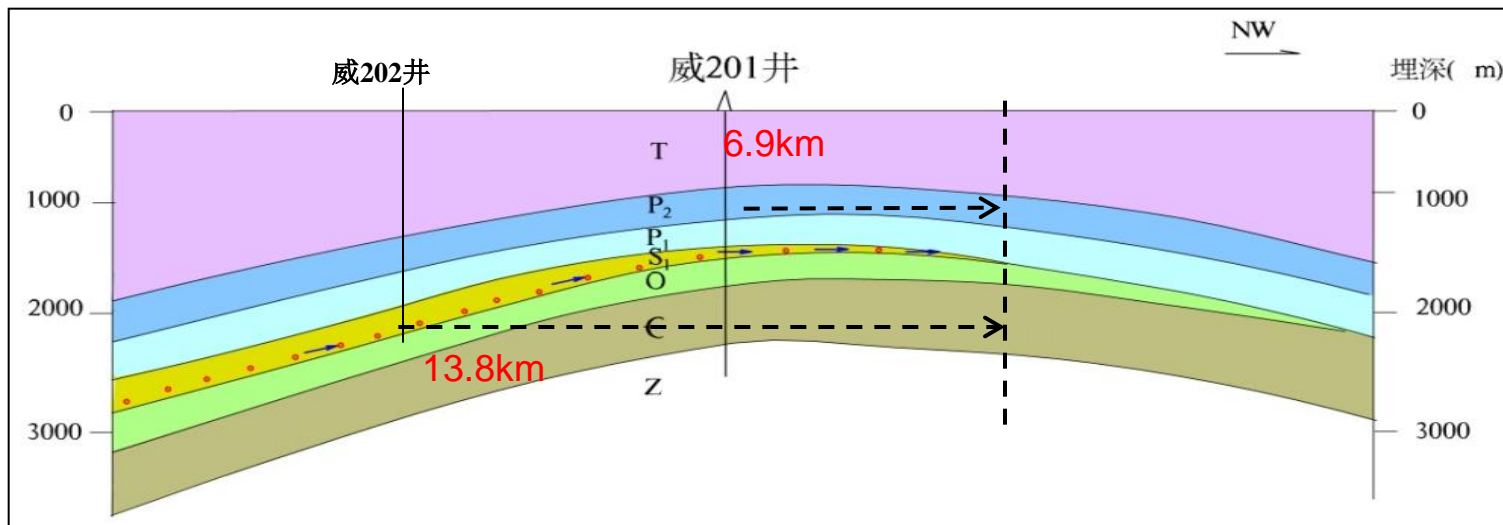
彭页1井：埋深2520m，压力系数0.9-1.0；
最高日产量2.5万方，电潜泵排液生产

彭页3井：埋深3019m，最高日产量3.5万方，
自喷生产

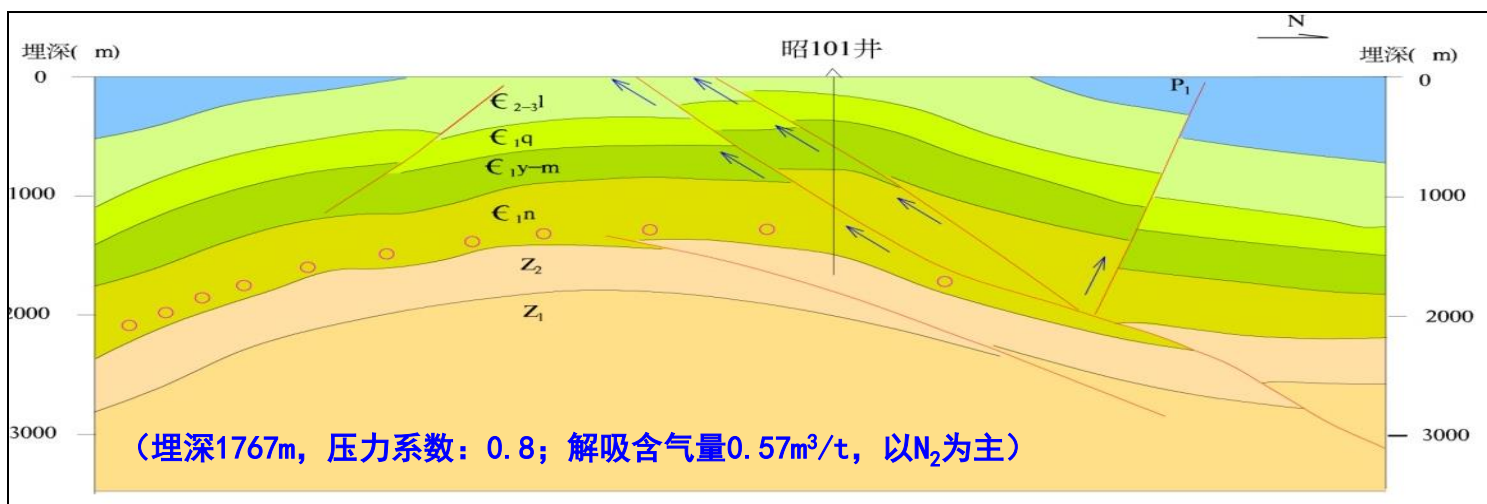


模型4：靠近地层缺失带，页岩气侧向扩散散失

威202井：埋深2573m，压力系数1.40；直井日产量2.75万方 威201井：埋深1535m，压力系数0.92；直井日产量0.26万方



模型5：靠近通天断层，页岩气渗流散失



3、以“二元富集”理论为指导，形成了海相页岩气选区评价体系与标准

以页岩品质为基础，以保存条件为关键，以经济性为目的，建立了三大类18项参数的海相页岩气评价体系与标准。

南方海相页岩气评价体系与标准

参数类型	参数名称	权值	分 值			
			1.0~0.75	0.75~0.5	0.5~0.25	0.25~0
优质泥页岩发育 0.3	页岩厚(m)	0.1	>40	40~30	20~30	10~20
	有机碳含量(%)	0.3	>4	4~2	2~1	<1
	干酪根类型	0.1	I 型	II 1型	II 2型	III型
	成熟度 (Ro)	0.1	1.2~2.5	1.0~1.2或2.5~3.5	0.7~1.0或3.5~4.0	0.4~0.7或>4.0
	脆性指数(%)	0.3	>60	60~40	40~20	<20
	物性(%)	0.1	>6	6~4	4~2	<2
保存条件 0.4	断裂发育情况	0.2	断裂不发育	断裂较少	断裂较发育	断裂发育
	构造样式	0.1	褶皱宽缓	褶皱较宽缓	褶皱较紧闭	褶皱紧闭
	压力系数	0.4	>1.5	1.5-1.2	1.2-1.0	<1.0
	上覆盖层	0.1	侏罗-白垩系	三叠系	二叠系	志留系
	顶底板	0.2	非常致密	致密	较致密	不致密/不整合面
经济性 0.3	地表地貌条件	0.2	平原+丘陵面积>75%	平原+丘陵面积50-75%	平原+丘陵面积25-50%，中低山区为主	平原+丘陵面积小于25%；以高山、高原和沼泽为主
	埋深（m）	0.2	1500~3500	3500~4500	>4500或500~1500	0~500
	资源量（亿方）	0.2	>500	200-500	100-200	<100
	产量	0.1	≥10	≥3~<10	≥0.3~<3	<0.3
	水系	0.1	河流发育，有水库	河流较发育，临近有水库	水系欠发育，仅有河流	无较大河流
	市场管网	0.1	市场发育，已有管网	临近有管网	有市场，拟规划管网	无管网，市场不发育
	道路交通	0.1	国、省道覆盖全区	国、省道覆盖一半地区，	县级道路覆盖全区	交通不发达

(二) 攻关形成了页岩气勘探评价和工程配套技术系列，支撑了涪陵页岩气田发现

1、探索建立了页岩储层测井评价技术系列

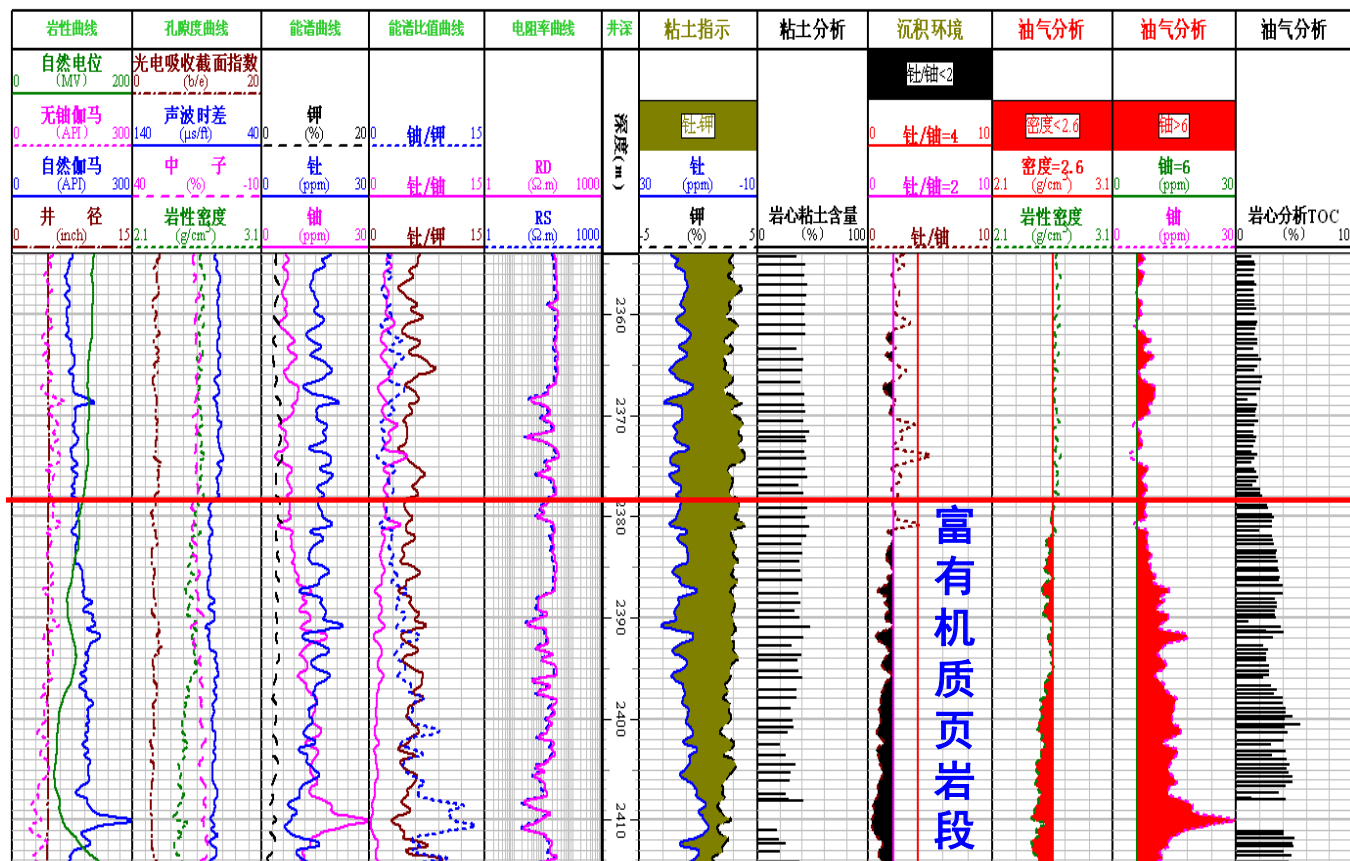
◆建立了海相页岩气层测井资料快速识别模式(已申请专利)

叠合曲线一：钍钾（TH-K）叠合定性识别粘土矿物；两者分离越开，粘土矿物含量越高；

叠合曲线二：钍铀比值划分沉积环境；小于2为强还原环境，2-4为半还原-强还原环境；

叠合曲线三：岩性密度值划分富有机质页岩段；小于2.6g/cm³为富有机质页岩段；

叠合曲线四：铀（U）值划分富有机质页岩段； 大于6ppm为富有机质页岩段。



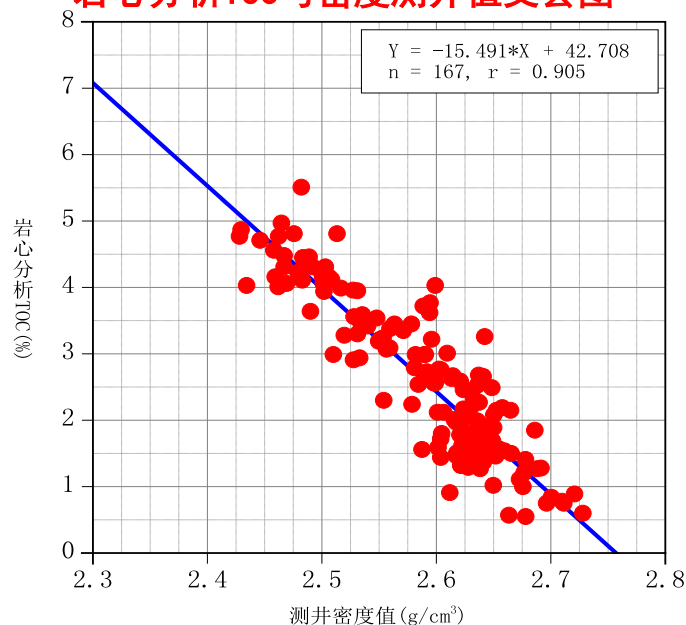
优质页岩“四高三低”特征：

- ◆高自然伽玛
- ◆高铀
- ◆高声波时差
- ◆高电阻率
- ◆低密度
- ◆低中子
- ◆低无铀伽玛

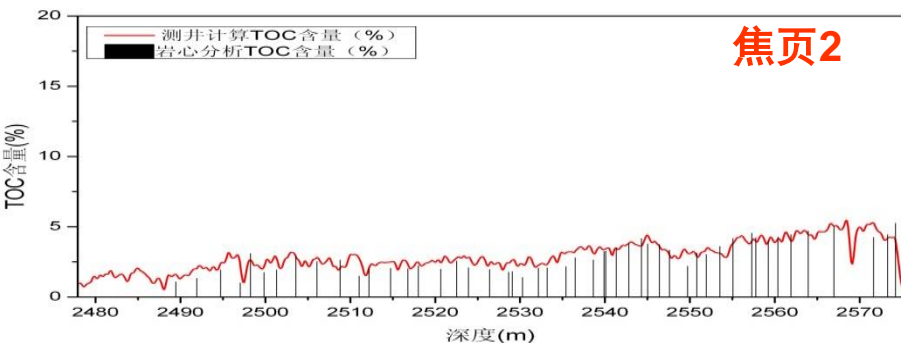
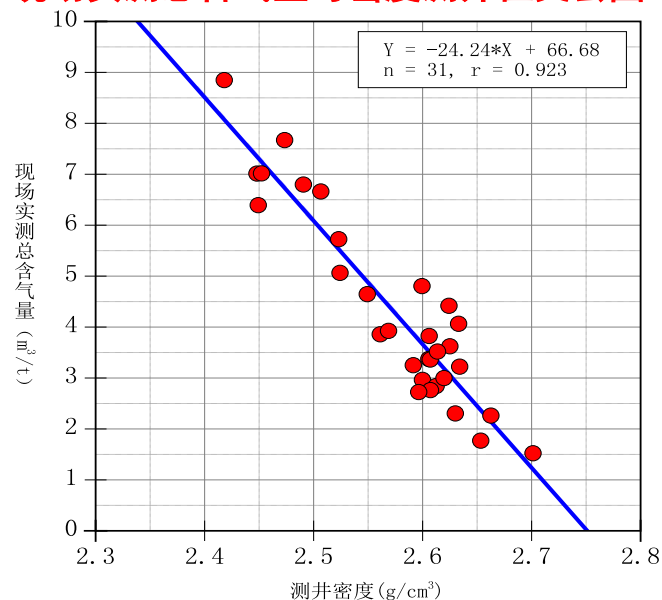
◆建立了计算TOC、含气量的岩性密度解释模型(已申请专利)

以大量实验分析地化数据为基础，分析测井曲线的敏感性与相关性，建立了岩性密度解释模型。

岩心分析TOC与密度测井值交会图

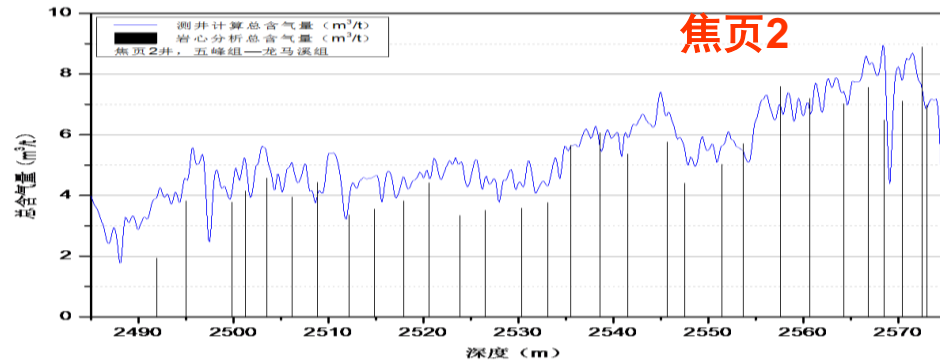


现场实测总含气量与密度测井值交会图



焦页2

模型解释精度高： 相对误差5.75%



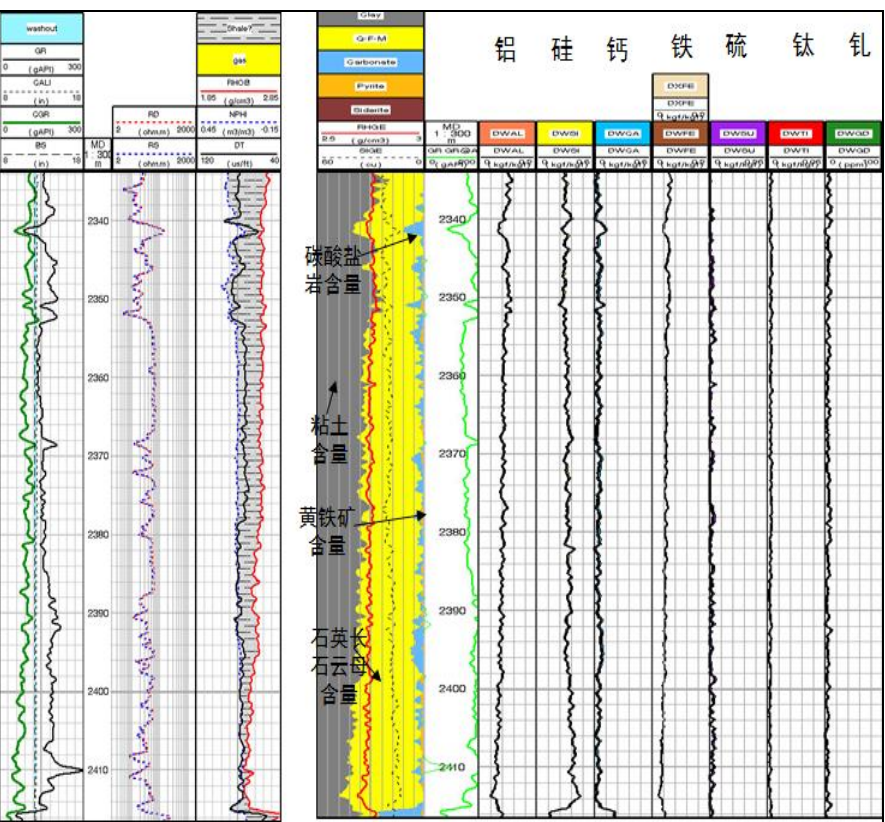
焦页2

相对误差0.41%

◆形成了基于元素俘获测井（ECS）与混合骨架密度的矿物含量与孔隙度解释模型（已申请专利）

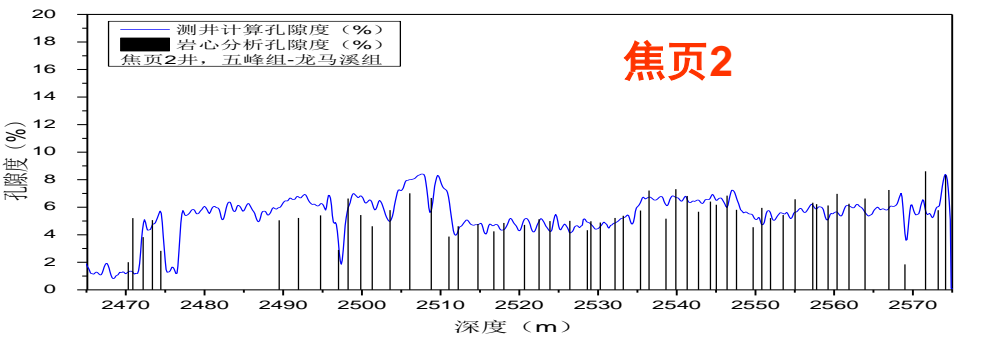
针对页岩气层复杂的矿物成分和孔隙结构，研究并首次提出计算矿物成分含量和孔隙度新方法，提高了解释精度，形成了页岩气层测井精细解释和储量计算支撑技术。

焦页1井ECS测井岩性矿物组分处理成果图



- ①基于元素俘获测井（ECS）计算矿物含量
- ②基于元素俘获测井（ECS）与混合骨架密度法计算储层孔隙度

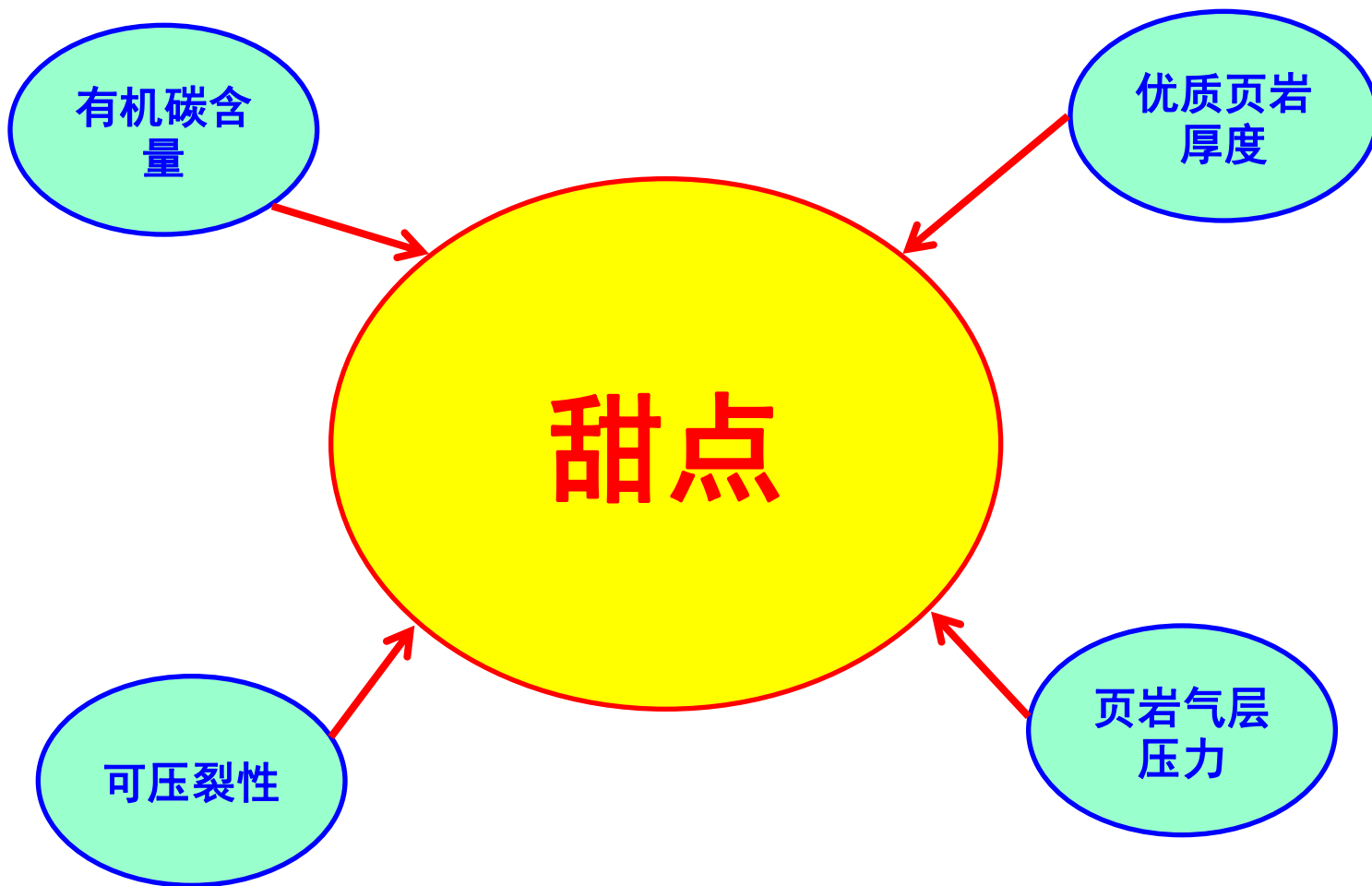
$$\rho_{ma} = A1 * (DWAL) + B1 * (DWCA) + C1 * (DWFE) + D1 * (DWSI) + E1 * (DWSU) + P1$$
$$\phi_t = (\rho_{ma} - \rho_b) / (\rho_{ma} - \rho_f)$$



孔隙度解释精度高，相对误差介于-7.6 %~1.43%。

2、攻关形成了页岩气地震“甜点”综合预测技术系列

通过技术攻关，形成了页岩气地震“甜点”综合预测关键技术，实现了优质页岩气层的有效预测。（申请6项专利）



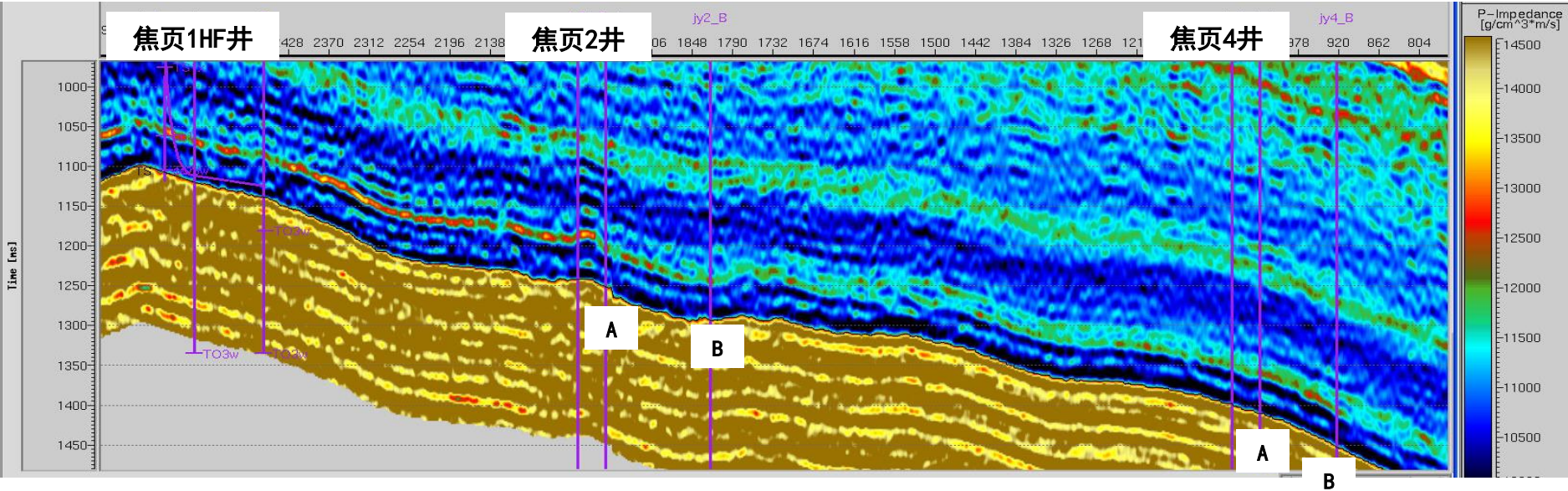
◆波阻抗反演页岩厚度预测技术

页岩与上下围岩波阻抗差异明显，波阻抗反演可实现页岩厚度预测，预测相对误差小于8%。

利用二维地震资料预测成果，部署的6口探井均钻遇优质页岩气层。

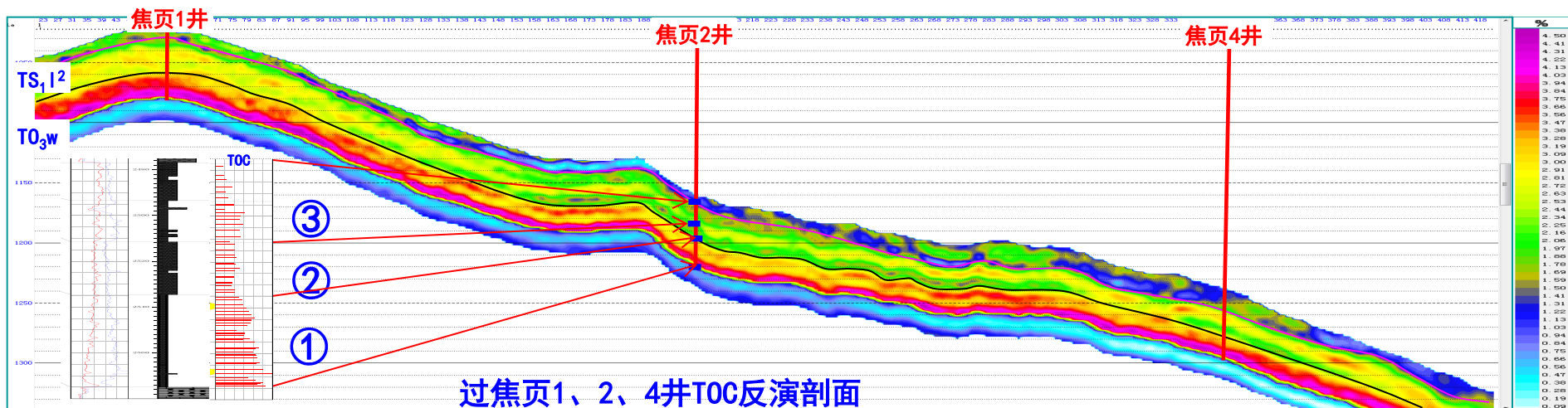
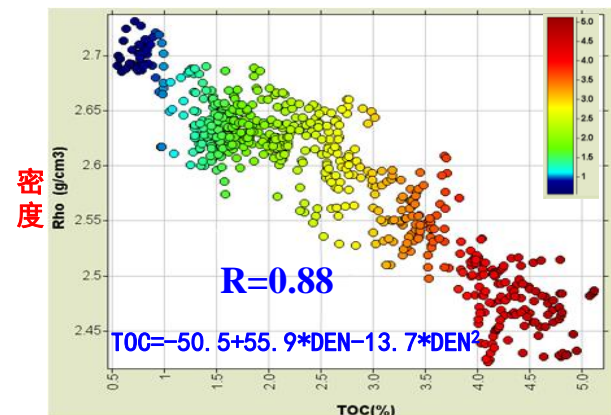
井名	预测厚度(m)	实钻厚度(m)	绝对误差(m)	相对误差(%)
焦页1井	96	89	-7	7.3
焦页2井	105	98	-7	6.7
焦页3井	99	102	3	3.1
焦页4井	90	84	-6	6.7

过焦页1HF-焦页2-焦页4井波阻抗剖面图（97-JS-4）



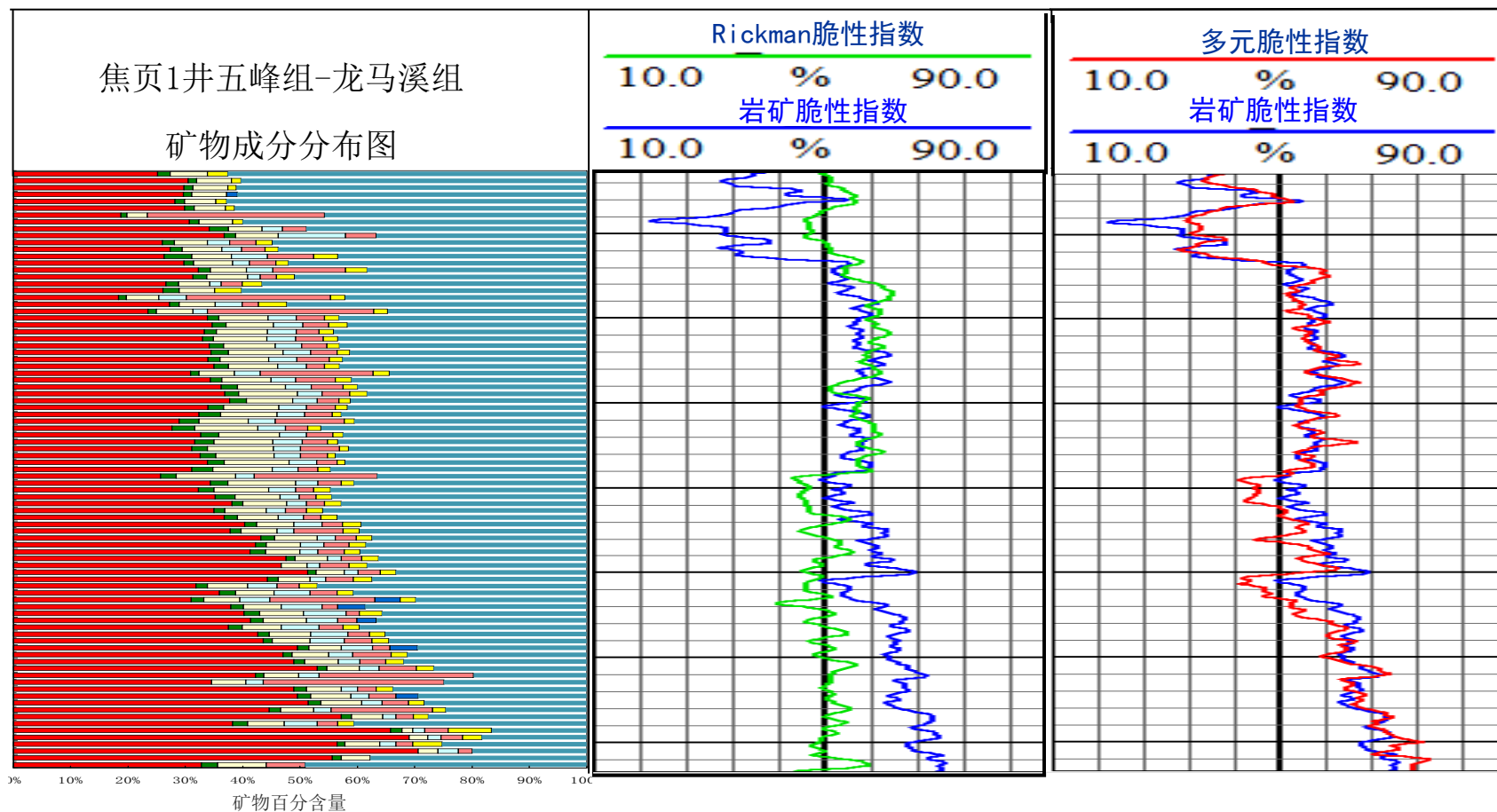
◆高精度叠前密度反演TOC预测技术

通过交汇分析，密度与TOC相关性最高，高精度叠前密度反演能够有效的实现TOC预测，预测获得了较高的精度（相对误差小于2%）。



◆叠前纵横波联合弹性参数反演页岩气层可压性预测技术

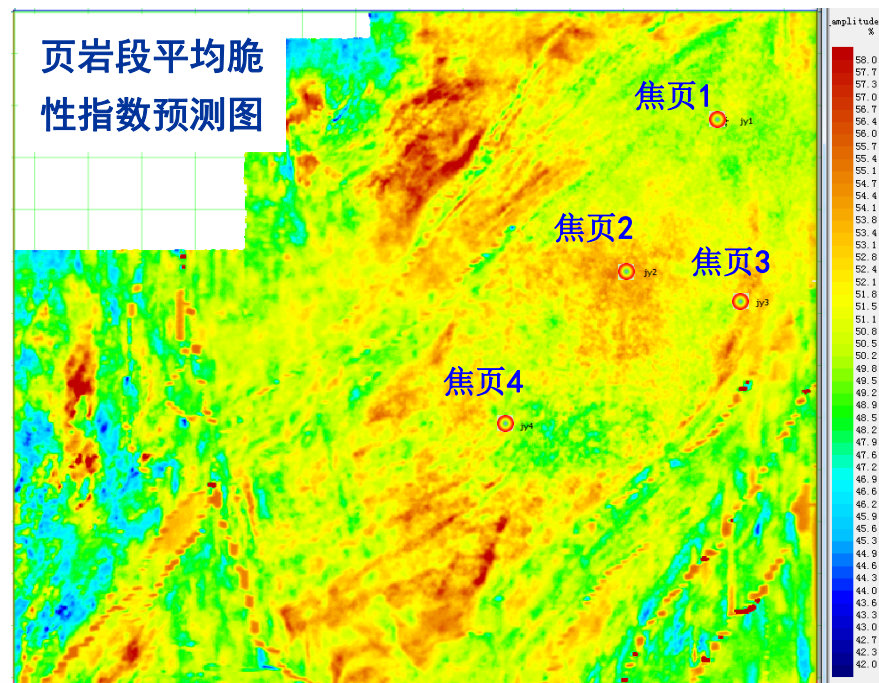
建立了矿物组成脆性指数与弹性参数（ λ ρ 、 μ ρ 、 E 、 ν ）之间的多元计算模型，提出新的脆性指数计算方法，相关系数从0.47提高到0.80，实现页岩可压性的高精度预测。



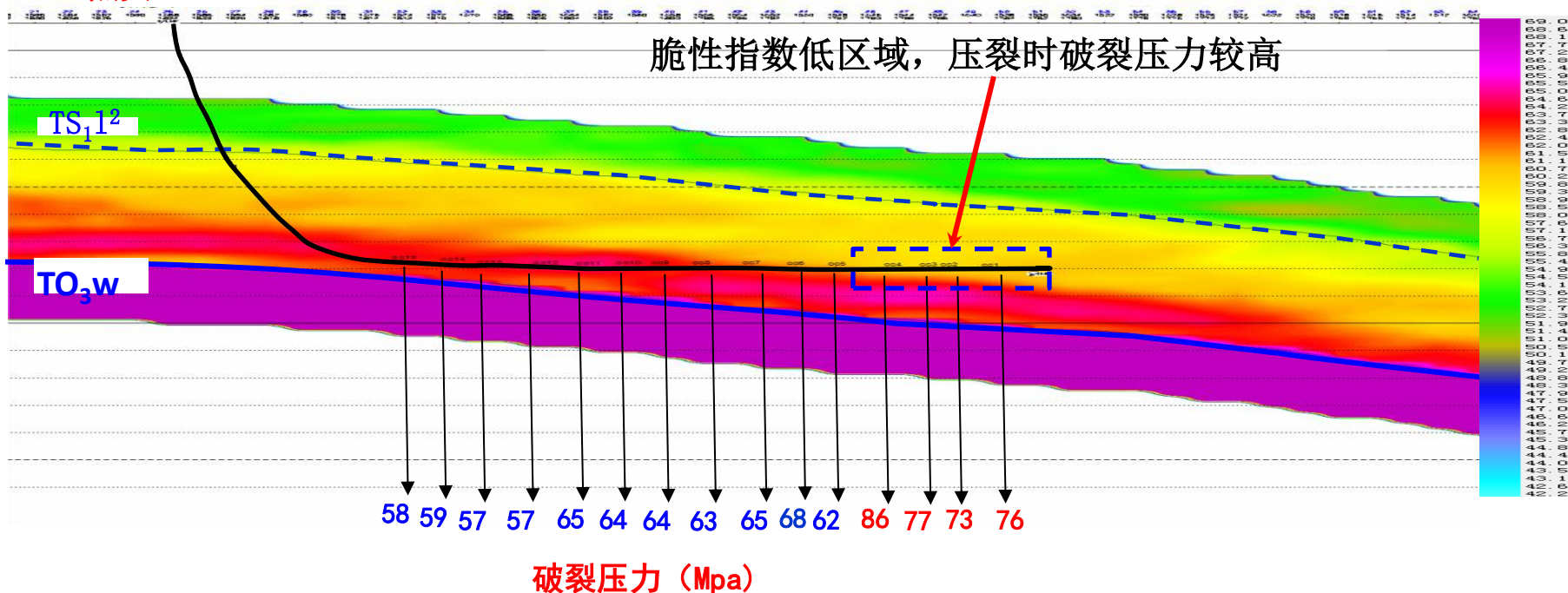
多元脆性指数预测精度高

焦石坝主体页岩层平均脆性
指数为50%-60%，页岩层整体可压
性好。

页岩段平均脆
性指数预测图



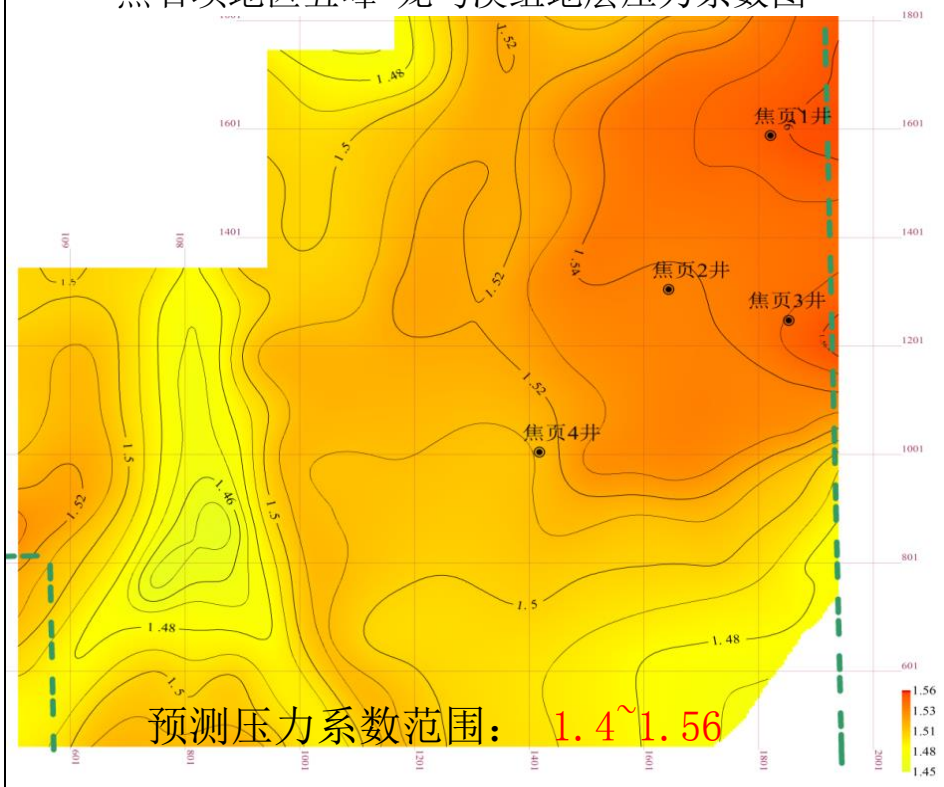
焦页1HF



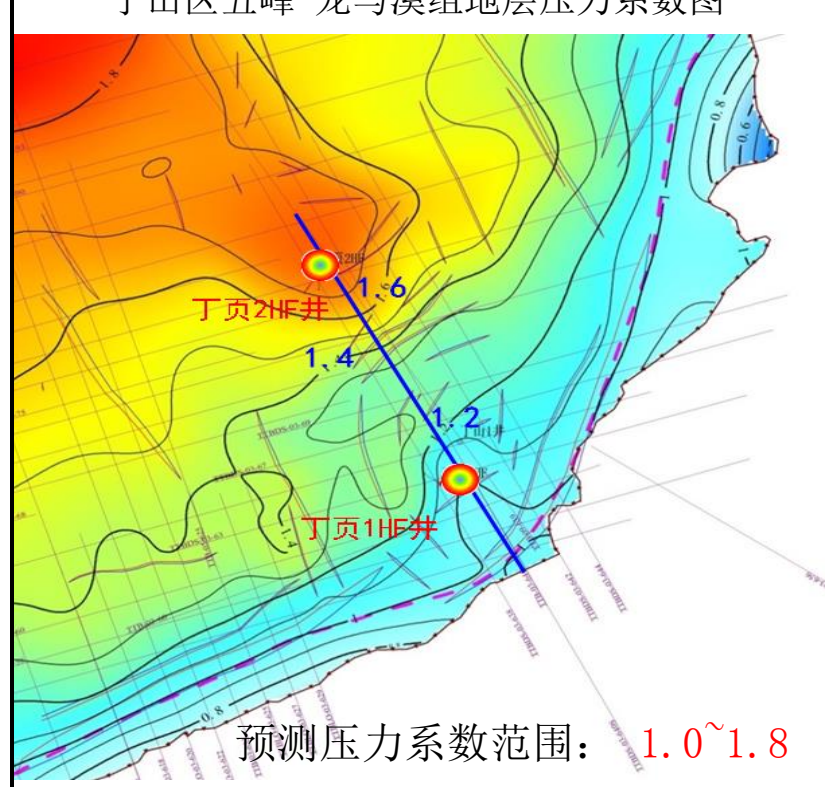
◆形成基于先验趋势约束的层速度场建模技术

克服了Dix公式的缺点，提高了速度模型精度，较好地解决了页岩气层压力预测技术难题，实现有利保存区的成功预测

焦石坝地区五峰-龙马溪组地层压力系数图



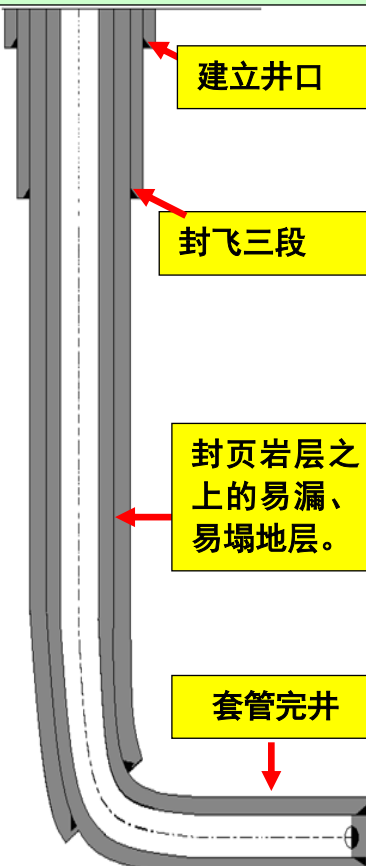
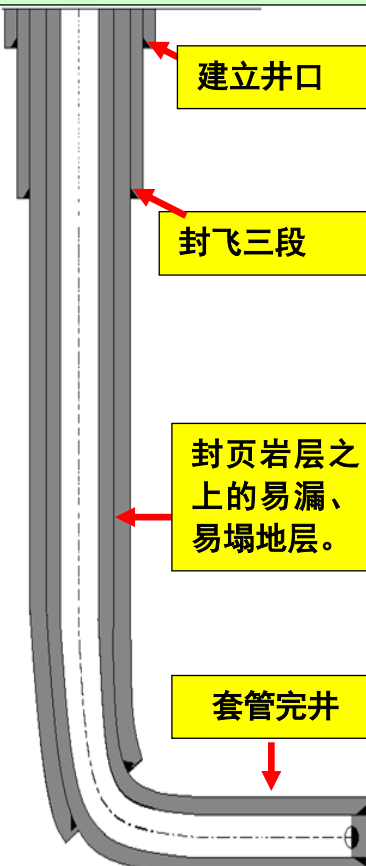
丁山区五峰-龙马溪组地层压力系数图



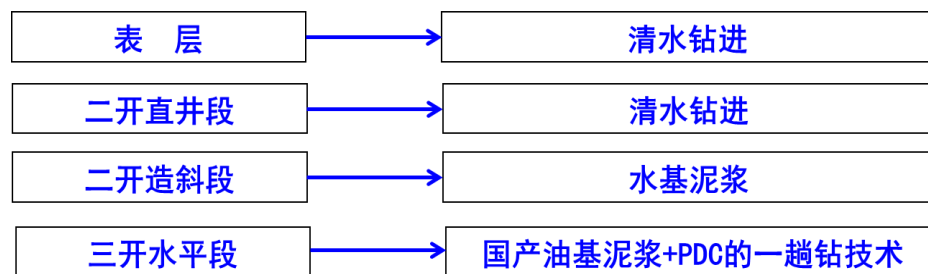
3、形成了水平井钻完井、分段压裂改造配套技术系列

◆形成了焦石坝区块水平井钻井技术系列

“三段式”井身结构

地层		开钻 次数	套管直径 mm ×下深 m	钻井液 体系	井身结构	
系	组					
三 叠	嘉陵江组	导管	508.0×50	般土浆		
	飞仙关组	一开	339.7 套管 封飞仙关组	清水		
二 叠	长兴组	二开	244.5 套管 封龙马溪组标 准层“浊积砂”	清水		
	龙潭组					
	茅口组					
	栖霞组			钻井液 (水基)		
	梁山组					
石炭	黄龙组	三开	139.7 套管	油基 钻井液		
志 留	韩家店组					
	小河坝组					
	龙马溪组					

“三开”钻井方式



针对焦石坝复杂地表（溶洞、暗河发育）和复杂地层（水层、浅层气、井漏等）条件，通过2013年攻关与实践，形成了适应涪陵页岩气的优快钻井、油基钻井液和长水平段固井三大技术系列。钻井工程关键技术实现了国产化。

◆形成了有效的压裂工艺技术，支撑了页岩气高效勘探

形成的两低三好（低伤害、低摩阻，好携砂、好反弹、好配置）滑溜水、两低四好（低伤害、低摩阻，好造缝、好水化、好反弹、好配置）活性胶液压裂液体系和“3343”压裂模式，实现了焦石坝地区页岩气有效压裂。

“3343”压裂模式

- 3种压裂液：酸液+滑溜水+活性胶液
- 3种支撑剂：100目粉陶+40/70目低密覆膜砂+30/50目低密覆膜砂
- 4种排量：酸预处理+前置升排量+携砂稳排量+顶替降排量
- 3种加砂模式：低砂比打磨配合多段塞加砂+中砂比台阶小段塞加砂+中高砂比台阶大段塞加砂

不当之处敬请
批评指正。

谢谢！

焦页1HF井点火照片

