

文章编号:1000-0550(2017)04-0772-09

doi: 10.14027/j.cnki.cjxb.2017.04.011

渝东北田坝地区五峰—龙马溪组页岩矿物学特征及其油气地质意义

杨宇宁^{1,2}, 王剑³, 郭秀梅³, 熊小辉³

1. 成都理工大学研究生院, 成都 610082

2. 四川中成煤田物探工程院有限公司, 成都 610072

3. 国土资源部沉积盆地与油气资源重点实验室, 成都地质矿产研究所, 成都 610082

摘要 渝东北田坝地区五峰—龙马溪组泥页岩的矿物成分主要为石英和黏土矿物, 其次为长石, 此外还含有少量黄铁矿、硬石膏等含硫矿物, 以及极少量的碳酸盐矿物。沉积学及矿物学研究表明, 五峰—龙马溪组的沉积环境以浅海陆棚为主, 而浅海陆棚属还原环境, 有利于有机质富集和保存, 可以更好地形成页岩气; 页岩含石英量较多并且脆性指数较高, 因此有利于形成裂缝以利于渗流。与相邻的涪陵地区相对比, 两者可比性较高, 并且渝东北田坝地区五峰—龙马溪组页岩的石英等脆性矿物含量大于涪陵地区, 而黏土矿物含量、碳酸盐矿物含量远小于涪陵地区; 渝东北田坝地区黏土矿物组合反映, 五峰—龙马溪组已进入了晚期成岩作用阶段, 该阶段所对应的有机质成熟度为高成熟—过成熟, 表明其成熟度条件有利于形成页岩气藏; 进一步研究还发现, 五峰组及龙马溪组页岩具有较高的孔隙度和渗透性, 能为页岩气储存提供较好的储集空间。

关键词 页岩气; 五峰—龙马溪组; 矿物学; 沉积学; 渝东北; 田坝地区

第一作者简介 杨宇宁, 女, 1987年出生, 博士, 含油气盆地沉积与层序地层, E-mail: yyn8711@163.com

通讯作者 王剑, 男, 研究员, E-mail: w1962jian@163.com

中图分类号 P588.22 P618.13 **文献标识码** A

0 引言

页岩气作为一种非常规天然气资源, 是常规的油气能源重要的战略接替^[1]。近年来, 由于美国页岩气勘探开发取得了重要突破, 我国也加入页岩气勘探开发的行列^[2]。上扬子五峰—龙马溪组黑色页岩厚度大、分布稳定、有机质含量高, 因此被视为优质的海相富有机质页岩, 尽管其热演化程度较高, 后期构造作用较强, 但近年来在上扬子地区海相页岩气勘探方面, 仍然取得了一系列重大突破^[3-7]。

然而, 有关五峰—龙马溪组黑色页岩的矿物学组成特征及其沉积学方面的研究还有待深入。事实上, 中国南方五峰—龙马溪组黑色页岩的矿物学组成特征是不一样的, 它们的矿物组成成份变化极大, 而且它们与页岩气富集区关系十分密切。例如, 川东南地区黏土矿物含量为41.6%, 石英含量为36.1%, 方解石和白云石含量为9.9%^[8]; 川南地区黏土矿物含量为29.9%, 长石和石英含量为53.7%, 碳酸盐矿物含量为16.4%^[9-10]; 鄂西渝东地区黏土矿物含量为

30.6%, 长石和石英含量为67.8%, 碳酸盐矿物含量为1.6%^[11]; 而在长宁地区黏土矿物含量为48.5%, 石英含量为31.3%, 方解石含量为20.2%^[12]。此外, 五峰—龙马溪组页岩矿物成分在纵向方面也存在差异, 五峰—龙马溪组从底到顶石英的质量分数逐渐降低, 由五峰组下段的44.3%降至龙马溪组上段的27%; 黏土矿物逐渐增加, 五峰组下段为35%, 龙马溪组下段黑色页岩段为40.1%, 龙马溪组上段非黑色页岩段为53%^[13]。通过这些特征对比研究及其与页岩含气性相关关系研究, 可为页岩气“甜点”的确定、有利区块和有利层段预测等提供有效依据。

以渝东北田坝地区五峰—龙马溪组富有机质页岩的矿物组成特征及其沉积学特征为主线, 探讨页岩气储层矿物成分特征所揭示的沉积埋藏演化信息, 如成岩阶段、热成熟度、沉积环境等^[14], 并且在页岩气成藏机理分析、资源评价及开发工艺设计等均要用到矿物成分的研究成果^[15]。以渝东北地区出露最完整的田坝剖面为解剖重点, 开展详细观察测量和系统采样, 结合区域上其他观测剖面, 开展沉积学分析研

究,通过实验室 X 射线衍射资料形成了田坝地区五峰—龙马溪组野外露头矿物成分剖面,从而对沉积成岩、环境、成熟度及储层物性影响因素开展深入的研究与分析。

1 地质背景

渝东北田坝剖面位于巫溪县田坝乡。区域构造上,研究区位于扬子准台地与秦岭造山系过渡地区,扬子板块的北缘沙市隐伏断裂以北的区域,包括了大巴山台地边缘坳陷与大巴山褶皱区部分地区(图 1)。地质构造极为复杂,在平面上城口—房县断裂将其分为北、南大巴山冲断褶皱带,北大巴山被认为是南秦岭造山带和扬子地块之间的拼合带,南大巴山代表了典型的前陆冲断褶皱带的特点^[16-19]。根据渝东北地区所处的大地构造位置及不同时期构造变形性质与特征等,将工区构造地质单元划分为 2 个一级构造单元、2 个二级构造单元、1 个三级构造单元和 1 个四级构造单元。

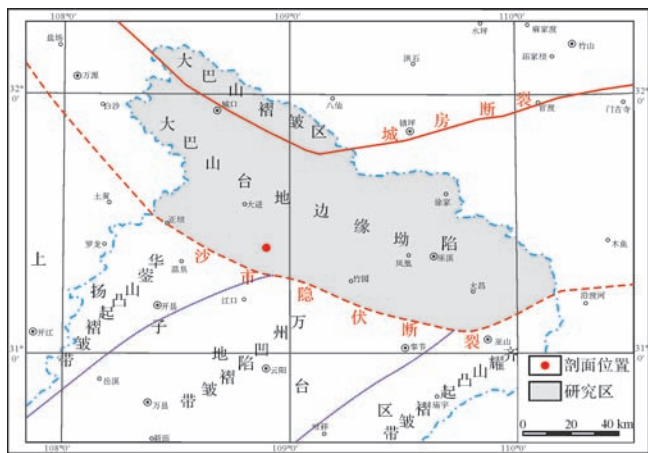


图 1 研究剖面位置及大地构造图

Fig.1 Location of Tianba profile and structural characteristics

五峰—龙马溪组是该区一套主要富有机质泥页岩层段^[20],主要为深水还原沉积环境下的产物,总体厚度为 39~140 m,岩性组合特征:下部为黑色薄层状硅质岩与碳质、粉砂质页岩互层,中部灰黑色碳质粉砂质页岩,黑色碳质笔石页岩;上部黑色页岩夹泥质白云岩透镜体及钙质粉砂岩。

2 实验研究

2.1 实验设备与条件

矿物成份 X 射线衍射技术的应用范围非常广泛,现已渗透到地质学和含油气盆地分析中,成为一种重要的分析方法^[21]。实验室测试工作在国土资源

部重庆矿产资源监督检测中心完成。黏土矿物和全岩分析使用仪器 ZJ207 型 X 射线衍射仪,测试温度为 24℃,检测依据 SY/T5163—2010,检测条件如下:靶型:Cu,辐射:K α ,滤光片:Ni,起始角:3°(2 θ),终止角:45°(2 θ),步速:2 deg/min,步长:0.02°,工作电流:40 Ma,工作电压:40 kv,狭缝:发散,散射狭缝均为 1°;岩石物性测试温度为 27℃,湿度 50%,依据 SY/Y 5336—2006 标准,使用 ZJ206 覆压孔渗测定仪采用非稳态压力脉冲衰减法完成。

2.2 实验取样

渝东北巫溪县田坝乡的田坝剖面地层沿省道 102 出露,出露率达 90%以上,层间接触关系清楚,并在走向上有一定延伸。地层倾角从底部 30°向上变化到 50°。五峰组的岩性主要为黑色薄—中层状硅质岩与碳质、粉砂质页岩互层,分为 3 个小层,龙马溪组共分为 10 个小层,主要岩性为黑色碳质粉砂质页岩、黑色碳质页岩和黑色页岩夹泥质白云岩透镜体及钙质粉砂岩。五峰—龙马溪组视厚度为 112.4 m,真厚度为 81.42 m。在五峰组底部以及龙马溪组底部到中上部均顺层分布一些个体大小不一的笔石。龙马溪组水平层理发育,中下部可见黄铁矿晶粒顺层面均匀分布。田坝剖面可以清晰地观察到临湘组—新滩组各组的分界面(图 2)。

在详测剖面时进行了系统采样,共采集了 4 个五峰组的页岩样品,19 个龙马溪组泥岩样品。结合岩性特征和各样品在剖面上的位置,最终选定了 17 个样品进行全岩分析,10 个样品进行黏土矿物分析,8 个样品进行岩石物性的实验。

2.3 X 射线衍射测试结果

田坝剖面样品黏土矿物及全岩 X 衍射分析测试结果表明(表 1),17 个样品矿物成分含量有差异。样品总体来看石英含量最高,为 42.6%~88.2%,平均为 61.6%;其次为黏土矿物,为 12.9%~47.3%,平均为 27.8%;再次为长石,平均含量 8.29%;还含有少量的矿物如黄铁矿、石膏等,平均含量不足 5%。

田坝剖面五峰—龙马溪组泥岩/页岩的矿物成分较多,样品中均含有黏土矿物、石英和长石,黏土矿物中均含有伊利石、伊蒙混层,其中五峰—龙马溪组泥岩/页岩的主要组成矿物是石英和黏土矿物。大部分样品中含有长石等碎屑矿物,部分样品还含有绿泥石、黄铁矿等黏土矿物和自生矿物。

2.4 岩石物性测试结果

田坝剖面泥岩/页岩样品的物性分析结果显示

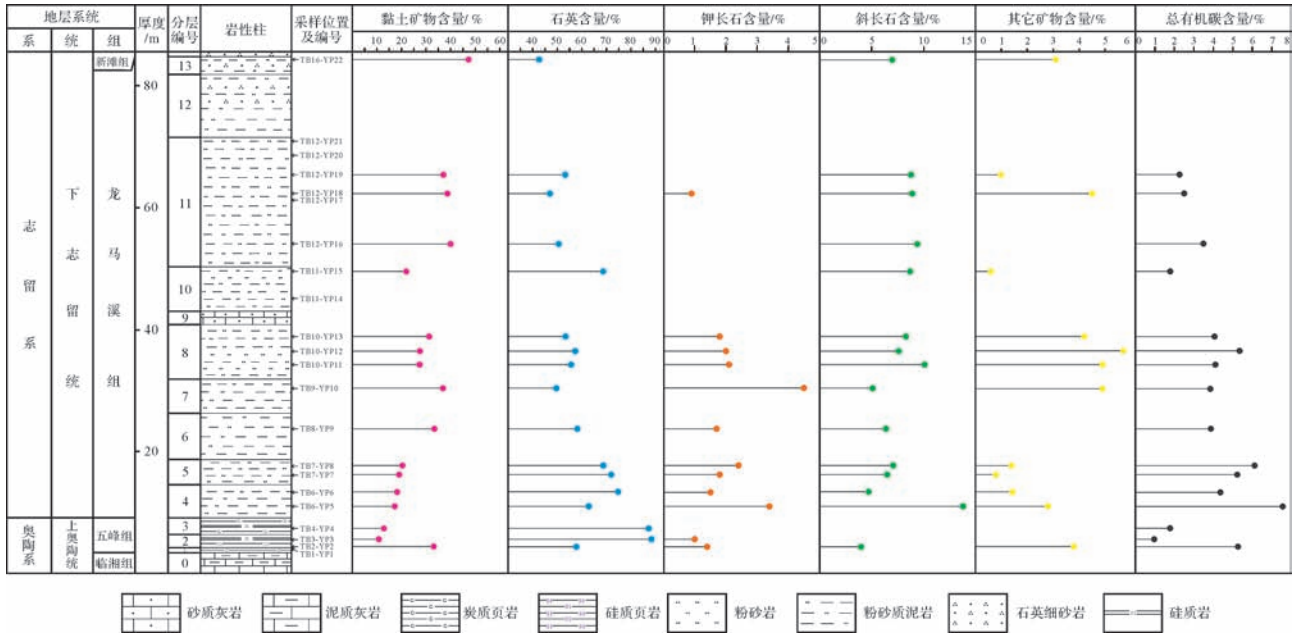


图2 田坝剖面五峰—龙马溪组详测剖面及样品分布图

Fig.2 Detailed surveying profile and sample distribution of Tianba Wufeng-Longmaxi Formation

表1 田坝剖面五峰—龙马溪组矿物成分 X 射线衍射分析结果

Table 1 XRD results of mineral composition of Tianba Wufeng-Longmaxi Formation shale

样品编号	层号	黏土矿物相对含量/%				全岩矿物质量分数/%						
		绿泥石	伊利石	伊蒙混层	黏土矿物	石英	钾长石	斜长石	黄铁矿	硬石膏	锐钛矿	其他
TB2-YP2	2	0	67	33	33	57.7	1.4	4	0	0.8	1.1	1.9
TB3-YP3	3	0	47	53	11	88.2	1	0	0	0	0	0
TB4-YP4	4	—	—	—	13	87.1	0	0	0	0	0	0
TB6-YP5	6	0	32	68	17	62.7	3.4	14	0	0	2.8	0
TB6-YP6	6	—	—	—	18	74.6	1.5	4.7	0	0	0.9	0
TB7-YP7	7	0	41	59	19	71.8	1.8	6.5	0	0	0.8	0
TB7-YP8	7	—	—	—	20	68.7	2.4	7.1	0	0	1.4	0
TB8-YP9	8	0	44	56	34	58.1	1.7	6.4	0	0	0	0
TB9-YP10	9	—	—	—	37	49.6	4.5	5.1	0	0.8	0	3.1
TB10-YP11	10	4	35	61	27	55.5	2.1	10	4.9	0	0	0
TB10-YP12	10	—	—	—	28	57.2	2	7.6	4.4	0	1.3	0
TB10-YP13	10	2	38	60	31	53.2	1.8	8.3	3.1	0	1.1	1.2
TB11-YP15	11	—	—	—	22	68.7	0	8.7	0	0.6	0	0
TB12-YP16	12	0	49	51	40	50.6	0	9.4	0	0	0	0
TB12-YP18	12	0	40	60	39	47	0.9	8.9	2	0	1.4	1.1
TB12-YP19	12	—	—	—	37	53.1	0	8.8	0	0	1	0
TB16-YP22	16	4	30	66	47	42.6	0	7	1.3	1.8	0	0

(表2),样品孔隙度在0.33%~14.42%之间,平均为5.96%;渗透率在(0.001 1~0.010 8)×10⁻³μm²之间,平均为0.004 1×10⁻³μm²。

3 页岩气储层条件分析研究

3.1 沉积环境与脆性矿物特征

3.1.1 沉积环境

矿物成分、含量及其结构特征(成分成熟度与结

构成熟度)对于缺少沉积构造的深水沉积环境分析是非常关键的依据之一,此外,沉积地球化学也是重要的判别依据。

上扬子地区五峰—龙马溪组为一套深水还原环境沉积的地层,分布广泛^[22]。X射线衍射结果表明,泥岩/页岩中的碎屑矿物石英含量平均为61.6%,长石含量平均为8.29%,黏土矿物含量平均为27.8%,还含有黄铁矿、硬石膏等含硫矿物;并在显微镜下观

观察到草莓状黄铁矿的存在,且该地区发现的黑色泥页岩也间接证明了沉积环境为还原缺氧环境。这些均能间接表明五峰—龙马溪为深水还原环境^[23-25]。这种还原环境有利于有机质富集和保存,可以更好地形成页岩气^[15]。结果中还显示田坝剖面五峰—龙马溪组中含极少碳酸盐矿物,究其原因有几点:其一田坝地区离物源区较近,陆源碎屑充足;其二从水体来说渝东北地区水体较深,形成水体超过 CCD 界面,形成的碳酸盐溶解。这两方面原因都能造成沉积水体不利于碳酸盐的形成。

表2 田坝剖面龙马溪组页岩岩石物性分析结果
Table 2 Physical properties of Tianba Longmaxi Formation shale

样品编号	层位	岩性描述	R ₀ /%	有效孔隙度 /%	渗透率 /10 ⁻³ μm ²
TB6-YP5	龙马溪组	含云质粉砂质泥岩	2.14	4.25	0.001 6
TB7-YP7	龙马溪组	含碳质含粉砂泥岩	2.03	4.73	0.003 9
TB8-YP9	龙马溪组	含碳质含粉砂泥岩	2.29	5.36	0.001 1
TB10-YP11	龙马溪组	含碳质粉砂质泥岩	2.33	0.40	0.001 6
TB10-YP13	龙马溪组	含碳质含粉砂泥岩	2.28	0.33	0.001 7
TB12-YP16	龙马溪组	含粉砂泥岩	2.16	9.06	0.004 3
TB12-YP18	龙马溪组	含粉砂泥岩	2.30	14.42	0.010 8
TB12-YP19	龙马溪组	含粉砂泥岩	—	9.11	0.008 1

熊小辉等在田坝剖面所做的地球化学测试得到样品的 δU 值在 1.03~1.78 之间,平均为 1.32, Ni/Co 比值在 5.6~117.5 间,平均 35.4, 并且微量元素 w(V)/w(V+Ni) 比值在 0.6~0.9 之间,平均为 0.81, 也指示一种厌氧、偶有强烈水体分层的沉积环境, 以上测试数据均证实了田坝地区沉积环境为缺氧还原环境^[26]。

3.1.2 脆性矿物特征

由于泥页岩原始孔渗率很低, 如果要对页岩气藏进行开发仅依靠原始孔渗是不现实的, 因此在开发过程中就需要压裂技术形成裂缝以利于渗流。在此就有必要研究页岩的脆性程度, 脆性越高则更有利于形成裂缝。岩石脆性与其矿物的成分有关, 目前认为对此起重要作用的是石英和方解石^[27]。这些矿物脆性较高, 有利于形成裂缝, 从而提高页岩气解析和渗流的能力, 进一步为游离态页岩气增加储存空间^[28]。田坝剖面中石英含量最高, 为 42.6%~88.2%, 平均为 61.6%; 还含有较多的长石, 平均含量为 8.29%, 说明储层的脆性矿物含量较高。脆性指数是评价页岩储层的一个重要参数, 岩石脆性指数的计算方法需运用

到岩石矿物学, 即脆性矿物与黏土矿物相对含量, 本文利用以下公式来计算田坝剖面的页岩脆性指数:

$$\text{脆性指数} = (\text{石英} + \text{长石} + \text{方解石}) / (\text{石英} + \text{长石} + \text{方解石} + \text{黏土矿物}) \times 100\% \quad (1)$$

通过以上公式计算得出田坝剖面五峰—龙马溪组的页岩脆性指数范围 51%~89%, 主值位于 60%~90% (图 3), 平均值为 71%。

图 4 和表 3 显示出北美页岩层的石英含量多在 50% 及以上, 脆性指数较高, 并且产气量较高; 表 3 中看出涪陵区块龙马溪组的石英含量大于 40%, 脆性指数也高, 产气量为高产。此外, 对比发现田坝剖面的石英、碳酸盐矿物及黏土矿物三元分布图与北美地区密西西比系的 Barnett 和 Woodford 含气页岩^[29]落在同一个区域, 表明它们具有较好的可比性 (图 4)。

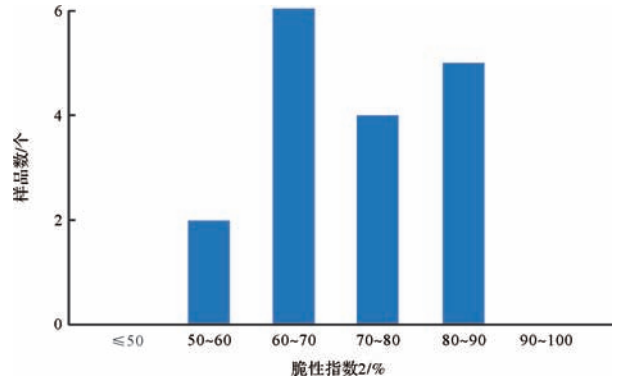


图3 田坝剖面五峰—龙马溪组页岩脆性指数频率分布图
Fig.3 Brittleness index distribution of Tianba Wufeng-Longmaxi Formation shale

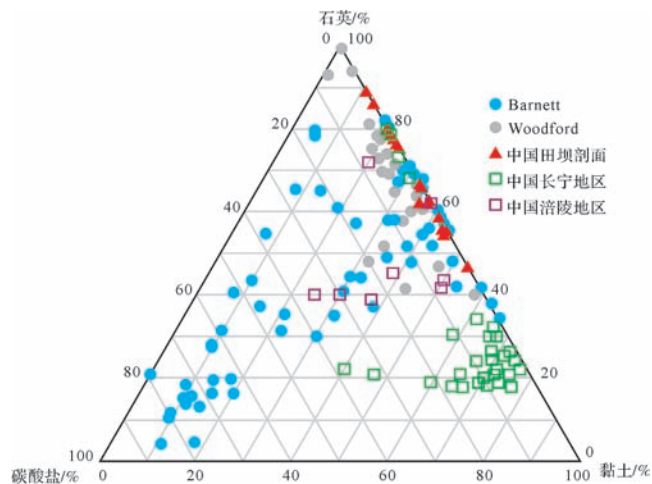


图4 中美页岩石英—碳酸盐—黏土矿物含量三角图
北美页岩数据源自文献[29]

Fig.4 The quartz-carbonate-clay mineral content triangle plot of Sino-American Shales

表3 北美页岩与田坝剖面页岩 TOC、 R_o 及石英矿物含量参数对比表Table 3 TOC, R_o and Quartz Content Parameters comparison of Tianba profile shale with North America shales

国家	页岩	TOC/%	R_o /%	石英/%	来源
美国	Fort Worth 盆地密西西比系 Barnett 组	1~12	0.6~1.6	35~50	
	Appalachian 盆地泥盆系 Ohio 组	1~4.5	0.4~1.3	45~60	
	Michigan 盆地泥盆系 Antrim 组	1~20	0.4~0.6	20~41	
	Illinois 盆地泥盆系 New Albany 组	1~25(8)	0.4~1.0	(50)	
	San Juan 盆地白垩系 Lewis 组	1~2.5	1.6~1.9	50~75	文献[30]
中国	涪陵地区龙五峰—龙马溪组	0.5~8.5	2.2~3.06	>40	文献[31]
	四川盆地长宁地区龙马溪组	0.44~11.34	0.5~2.5	16.2~75.2	文献[15,32]
	川东南彭水地区龙马溪组	0.52~3.32	>2	26.6~73.1	文献[33]
	渝东北地区田坝剖面五峰—龙马溪组	1~7.6	2.03~2.33	43~88	

田坝剖面的平均石英含量也较大,在 60%左右,因此,根据工程类比和田坝剖面地质调查可以得到,五峰组全段和龙马溪组的中下段至少有厚 72 m 的泥页岩具有利用压裂技术改造储层的初始条件。

3.2 黏土矿物组合与有机质成熟度分析

泥岩/页岩黏土矿物的组合特征、含量等与沉积环境、古气候、成岩作用等有密切关系,且成岩作用阶段及成熟度可以通过一些标志性黏土矿物的组合及其含量反映出来,而成熟度是评价页岩气藏的一个重要指标。X 射线衍射结果表明,田坝剖面黏土矿物组合主要是伊利石+伊蒙间层+绿泥石矿物,这种组合是晚期成岩阶段 B 亚期(或有机质高成熟阶段)组合特征^[34]。据赵杏媛对黏土矿物分布所总结出的 6 种分类模式来看^[35],属于 I 类,即正常转化型。从浅到深存在蒙脱石向伊利石以及高岭石向绿泥石两个转化序列,蒙脱石向伊利石转化序列为:蒙脱石→伊/蒙无序间层→伊/蒙有序间层→伊利石。从表 1 可以看出,田坝剖面的黏土矿物主要为伊蒙混层,次为伊利石黏土矿物,而含少量绿泥石。初步分析可能是沉积时形成的高岭石不多,并且在成岩场向弱碱性转变过程中多向伊利石转化^[36];而蒙脱石有一部分已经完全转化为伊利石,还有剩下的一部分属于过渡阶段,转化成为伊蒙间层矿物。绿泥石分布不规律且偶尔出现,可能不是成岩阶段形成的,而是从物源带来的。这种黏土矿物的组合形式反应了有机质高一过成熟阶段^[37],并且对田坝剖面所做的测试也得到(R_o 为 2.03%~2.33%,见表 2、表 3)其有机质成熟度为高一过成熟阶段,接近于美国 Marcellus 页岩(R_o 为 1.5%~3.0%)和 Woodford 页岩(R_o 为 1.1%~3.0%),而略低于邻区涪陵区块(R_o 为 2.2%~3.06%)^[38]。田坝剖面的矿物成分所反映的有机质成熟度说明其具有形成页岩气藏的成熟度条件。

3.3 矿物组成与储层物性的关系

大量研究表明^[35,39],矿物成分、含量、分布等特征直接影响储层孔隙的演化和保存。一般情况下,孔隙度和渗透率随着页岩中黏土总量的增加而降低,绿泥石相对含量的变化与孔隙演化趋势相反^[40],而该区绿泥石含量显著较少,据此规律推论,龙马溪组必然具有较高的孔渗率,根据实验得到该区域平均孔隙度较高(平均为 5.96%),渗透率也较高(平均为 $0.004 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)。田坝剖面中因为伊/蒙有序间层比为 6%左右,所以将伊/蒙有序间层纳入伊利石一起考虑。页岩剖面中伊利石含量与孔隙度呈正相关关系,而与渗透率也呈弱的正相关关系(图 5)。造成这一现象的原因是随伊利石不断生成其体积变小而使得孔隙体积有所增加,进而渗透率也相应地有所改善,但是由于伊利石晶体细小,会影响孔隙,使得渗透率受到一定影响。

钾长石与有效孔隙度和渗透率均呈负相关关系(图 6)。通常情况下,长石的溶蚀作用有利于储层次生孔隙的形成^[41]。但研究区的钾长石溶解作用发生在埋藏成岩阶段,该阶段页岩的流体活动为半封闭状态,钾长石的溶解作用与高岭石转化为伊利石相伴生,高岭石向伊利石转化消耗了流体体系中的 K^+ ,从而促进了钾长石的溶解,钾长石足够多以使高岭石全部转化为伊利石^[42-43]。

因此,钾长石的溶解对储层物性的影响就可以近似的看为伊利石含量与孔渗的关系,通过对比伊利石相对含量与孔渗的关系可以得出伊利石的相对含量越高,即钾长石溶蚀使高岭石转化为伊利石的比重越高,孔渗相对就越高。所以钾长石与孔渗有一定的负相关关系。根据分析可以得到该区域具有较高的孔隙度及渗透性,能为页岩气储存提供较好的场所。

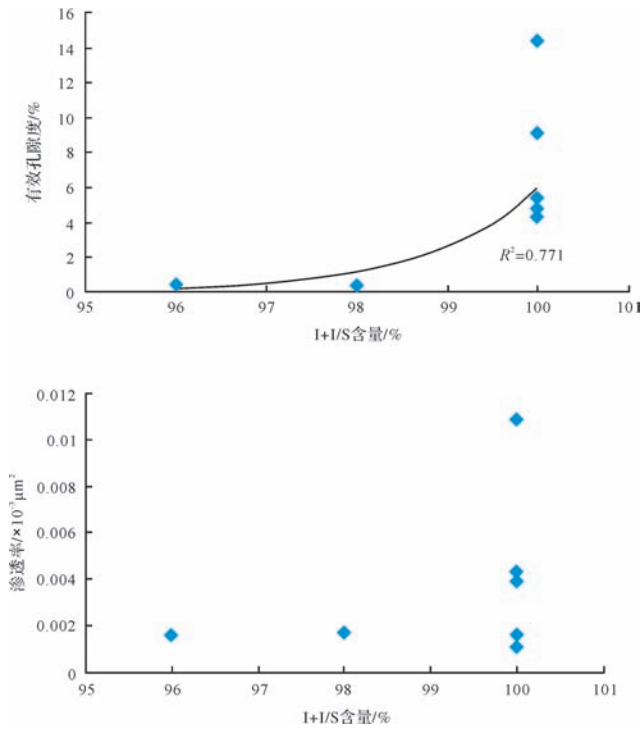


图5 田坝剖面页岩黏土矿物相对含量与物性关系图
Fig.5 Correlation of relative content of clay minerals with physical properties of Tianba profile

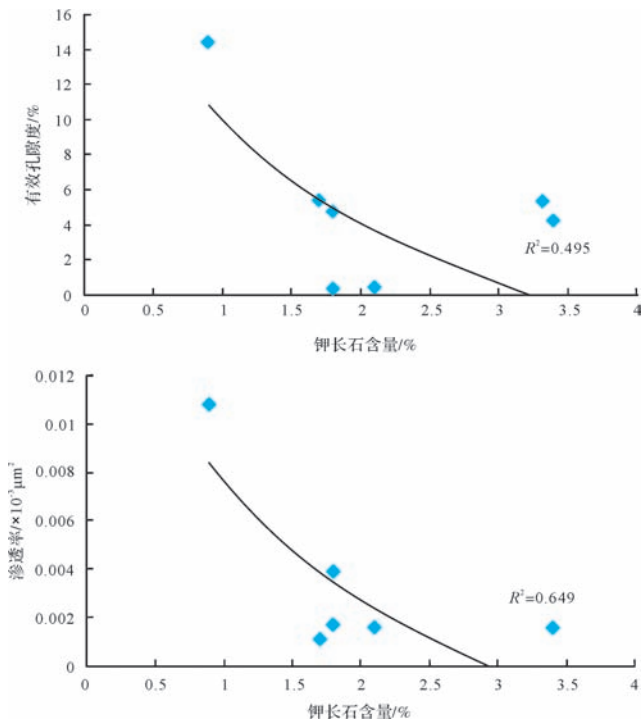


图6 田坝剖面页岩矿物相对含量与物性关系图
Fig.6 Correlation of relative content of minerals with physical properties of Tianba profile

3.4 区域对比研究

涪陵地区是目前我国页岩气勘探开发成果颇丰

的地区,且与本研究区相邻。因此,对相关重要参数进行对比研究,有利于渝东北地区页岩气潜力评价与靶区预测。

涪陵地区五峰—龙马溪组页岩的黏土矿物含量为16.6%~62.8%,平均为40.0%。黏土矿物以伊蒙混层为主,其次为伊利石,分别占黏土总量的54.0%和40.0%;脆性矿物含量为34.0%~80.0%,平均56.0%,其中以石英为主,其次是长石和方解石,含量分别为38.0%、9.0%、3.8%^[36]。渝东北地区与涪陵地区的五峰—龙马溪组页岩的页岩成熟度、总有机碳含量基本一致(表3)。但渝东北地区的脆性矿物含量远大于涪陵地区,以石英为主,几乎不发育碳酸盐矿物。两地区黏土矿物组成基本一致,但渝东北黏土矿物含量小于涪陵地区。因此,在岩石孔渗物性方面,渝东北地区田坝剖面五峰—龙马溪组页岩的孔隙度大于涪陵地区(4.51%),而渗透率远小于涪陵地区($0.12 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)^[31]。

造成这些差异的原因主要是沉积背景与构造两个方面的因素:沉积环境两者都属于深水沉积,但是涪陵地区外陆棚沉积环境较渝东北地区内陆棚沉积环境其水体更深,渝东北地区相对涪陵地区更靠近古陆隆起;而田坝剖面所在的渝东北地区紧邻褶皱带,构造更强烈,涪陵页岩气田主要在焦石坝背斜上,相对渝东北地区构造相对简单。其次是,涪陵地区埋深更深(2 330~2 415 m^[31]),而田坝剖面所在的渝东北地区地层受构造影响大部分抬升强烈。虽然渝东北与涪陵地区存在一定差异,但是各项参数都是有可比性的,特别是脆性指数更高,对于后期压裂开采更有利。

4 结论

通过对渝东北地区五峰—龙马溪组页岩矿物学特征研究我们可以得到以下几点认识:

(1) 研究区矿物组分在区域上及剖面上均变化较大,其中,石英含量为42.6%~88.2%,平均为61.6%;其次为黏土矿物,为12.9%~47.3%,平均为28.0%;再次为长石,平均含量8.29%;还含有少量的矿物如黄铁矿、石膏等,平均含量不足5%。这些研究成果为后续沉积环境分析、成岩作用分析及页岩气储集特征等研究提供了基础数据条件。

(2) 矿物成分含量、组合特征以及形态均能反映五峰—龙马溪为深水还原沉积环境。这种还原环境有利于有机质富集和保存,可以更好地形成页岩气。黏土矿物组合反映,五峰—龙马溪组已进入了晚期成岩

作用阶段,该阶段所对应的有机质成熟度为高成熟—过成熟,表明其成熟度条件有利于形成页岩气藏。

(3) 研究区页岩脆性指数较高,因此具有运用压裂技术的先决条件。并且利用三元图对比北美高产气量页岩发现,研究区页岩和北美页岩矿物组成可比性高,并且与相邻涪陵地区对比发现两者有一定差异,但是也有一定的相似之处,且研究区的脆性指数比涪陵地区还要高一些,因此可以得到,研究区页岩具备形成页岩气的初期条件。

(4) 根据矿物组成与储层物性分析发现,伊利石含量与孔隙度呈正相关关系,而与渗透率呈弱的正相关关系;样品钾长石含量较低而页岩有效孔隙度则较大,样品钾长石含量较高而页岩有效孔隙度较低。该现象印证了钾长石与有效孔隙度存在负相关关系。并且该区域矿物有效孔隙度和渗透率均较高,能为页岩气储存提供较好的场所。

参考文献 (References)

- [1] 张大伟,李玉喜,张金川,等. 全国页岩气资源潜力调查评价[M]. 北京:地质出版社,2012:6-42. [Zhang Dawei, Li Yuxi, Zhang Jinchuan, et al. The shale gas resource potential evaluation survey[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2012: 6-42.]
- [2] 李洋冰,任志勇,谢英刚,等. 世界页岩气勘探开发技术对中海油的借鉴作用分析[J]. 科技视界,2013(31):330-331. [Li Yangbing, Ren Zhiyong, Xie Yinggang, et al. The shale gas exploration and development technology used for reference by CNOOC's analysis[J]. Science & Technology Vision, 2013(31): 330-331.]
- [3] 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. [Zhang Jinchuan, Jiang Shengling, Tang Xuan, et al. Accumulation types and resources characteristics of shale gas in China[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(12): 109-114.]
- [4] 张金川,边瑞康,荆铁亚,等. 页岩气理论研究的基础意义[J]. 地质通报,2011,30(2/3):318-323. [Zhang Jinchuan, Bian Rui-kang, Jing Tieya, et al. Fundamental significance of gas shale theoretical research[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(2/3): 318-323.]
- [5] 董大忠,程克明,王玉满,等. 中国上扬子区下古生界页岩气形成条件及特征[J]. 石油与天然气地质,2010,31(3):288-299,308. [Dong Dazhong, Cheng Keming, Wang Yuman, et al. Forming conditions and characteristics of shale gas in the Lower Paleozoic of the Upper Yangtze region, China[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(3): 288-299, 308.]
- [6] 董大忠,邹才能,李建忠,等. 页岩气资源潜力与勘探开发前景[J]. 地质通报,2011,30(2):324-336. [Dong Dazhong, Zou Caineng, Li Jianzhong, et al. Resource potential, exploration and development prospect of shale gas in the whole world[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(2): 324-336.]
- [7] 周小琳,王剑,余谦,等. 页岩气藏地质学特征研究新进展——来自2011年AAPG年会的信息[J]. 地质通报,2012,31(7):1155-1163. [Zhou Xiaolin, Wang Jian, Yu Qian, et al. A review of geological characteristics of shale gas accumulation information from AAPG annual convention, 2011[J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31(7): 1155-1163.]
- [8] 刘友祥,俞凌杰,张庆珍,等. 川东南龙马溪组页岩的矿物组成与微观储集特征研究[J]. 石油实验地质,2015,37(3):328-333. [Liu Youxiang, Yu Lingjie, Zhang Qingzhen, et al. Mineral composition and microscopic reservoir features of Longmaxi shales in south-eastern Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(3): 328-333.]
- [9] Wu Yue, Fan Taijiang, Jiang Shu, et al. Characterization of the upper Ordovician Wufeng-lower Silurian Longmaxi marine shale of Well Xiye-1 in northwestern Guizhou Province, Southwest China: implication for shale gas potential[J]. AAPG Bulletin, 2014, 98(1): 14-17.
- [10] Ran Bo, Liu Shugen, Jansa L, et al. Origin of the Upper Ordovician-lower Silurian cherts of the Yangtze block, South China, and their palaeogeographic significance[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 108: 1-17.
- [11] 刘洪林,王红岩,刘人和,等. 中国页岩气资源及其勘探潜力分析[J]. 地质学报,2010,84(9):1374-1378. [Liu Honglin, Wang Hongyan, Liu Renhe, et al. China shale gas resources and prospect potential[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(9): 1374-1378.]
- [12] Wang Yue, Du Wei, Komiya T, et al. Macro-organismal palaeoecosystems in the late Doushantuoan of the ediacaran in Yangtze block, South China[J]. Paleontological Research, 2015, 19(3): 237-250.
- [13] 刘树根,王世玉,孙玮,等. 四川盆地及其周缘五峰组—龙马溪组黑色页岩特征[J]. 成都理工大学学报:自然科学版,2013,40(6):621-639. [Liu Shugen, Wang Shiyu, Sun Wei, et al. Characteristics of black shale in Wufeng Formation and Longmaxi Formation in Sichuan Basin and its peripheral areas[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2013, 40(6): 621-639.]
- [14] 王丹萍,周祖翼,韩广民,等. 巢湖北部地区海相地层黏土矿物特征及其地质意义[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2011,41(增刊1):169-180. [Wang Danping, Zhou Zuyi, Han Guangmin, et al. Characteristics and geological significance of clay minerals of marine sedimentary rocks in North Chaohu region[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2011, 41(Suppl.1): 169-180.]
- [15] 陈尚斌,朱炎铭,王红岩,等. 四川盆地南缘下志留统龙马溪组页岩气储层矿物成分特征及意义[J]. 石油学报,2011,32(5):775-782. [Chen Shangbin, Zhu Yanming, Wang Hongyan, et al. Characteristics and significance of mineral compositions of Lower Silurian Longmaxi Formation shale gas reservoir in the southern margin of Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(5): 775-782.]
- [16] 刘树根,徐国盛,徐国强,等. 四川盆地天然气成藏动力学初探

- [J]. 天然气地球科学, 2004, 15(4): 323-330. [Liu Shugen, Xu Guosheng, Xu Guoqiang, et al. Primary study on the dynamics of natural gas pools in Sichuan Basin, China[J]. Natural Gas Geoscience, 2004, 15(4): 323-330.]
- [17] 魏国齐, 刘德来, 张林, 等. 四川盆地天然气分布规律与有利勘探领域[J]. 天然气地球科学, 2005, 16(4): 437-442. [Wei Guoqi, Liu Delai, Zhang Lin, et al. The exploration region and natural gas accumulation in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2005, 16(4): 437-442.]
- [18] 沃玉进, 肖开华, 周雁, 等. 中国南方海相层系油气成藏组合类型与勘探前景[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(1): 11-16. [Wo Yujin, Xiao Kaihua, Zhou Yan, et al. Types of marine plays in southern China and exploration prospects[J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(1): 11-16.]
- [19] 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): 151-156. [Zhang Jinchuan, Nie Haikuan, Xu Bo, et al. Geological condition of shale gas accumulation in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(2): 151-156.]
- [20] 牟传龙, 周恩恩, 梁薇, 等. 中上扬子地区早古生代烃源岩沉积环境与油气勘探[J]. 地质学报, 2011, 85(4): 526-532. [Mu Chuanlong, Zhou Kenken, Liang Wei, et al. Early Paleozoic sedimentary environment of hydrocarbon source rocks in the middle-upper Yangtze region and petroleum and gas exploration[J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(4): 526-532.]
- [21] 庞小丽, 刘晓晨, 薛雍, 等. 粉晶 X 射线衍射法在岩石学和矿物学研究中的应用[J]. 岩矿测试, 2009, 28(5): 452-456. [Pang Xiaoli, Liu Xiaochen, Xue Yong, et al. Application of powder X-ray diffraction in petrology and mineralogy[J]. Rock and Mineral Analysis, 2009, 28(5): 452-456.]
- [22] 付小东, 秦建中, 腾格尔, 等. 烃源岩矿物组成特征及油气地质意义——以中上扬子古生界海相优质烃源岩为例[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(6): 671-684. [Fu Xiaodong, Qin Jianzhong, Tenger, et al. Mineral components of source rocks and their petroleum significance: A case from Paleozoic marine source rocks in the Middle-Upper Yangtze region[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(6): 671-684.]
- [23] 张正顺, 胡沛青, 沈娟, 等. 四川盆地志留系龙马溪组页岩矿物组成与有机质赋存状态[J]. 煤炭学报, 2013, 38(5): 766-771. [Zhang Zhengshun, Hu Peiqing, Shen Juan, et al. Mineral compositions and organic matter occurrence modes of Lower Silurian Longmaxi Formation of Sichuan Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(5): 766-771.]
- [24] 陈吉, 肖贤明. 南方古生界 3 套富有机质页岩矿物组成与脆性分析[J]. 煤炭学报, 2013, 38(5): 822-826. [Chen Ji, Xiao Xianming. Mineral composition and brittleness of three sets of Paleozoic organic-rich shales in South China area[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(5): 822-826.]
- [25] 梁超, 姜在兴, 郭岭, 等. 陆棚相黑色泥岩发育特征、沉积演化及页岩气勘探前景——以瓮安永和剖面牛蹄塘组为例[J]. 大庆石油学院学报, 2011, 35(6): 13-21. [Liang Chao, Jiang Zaixing, Guo Ling, et al. Characteristics of black shale, sedimentary evolution and shale gas exploration prospect of shelf facies: taking Weng'an Yonghe profile Niutitang Group as an example[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2011, 35(6): 13-21.]
- [26] 熊小辉, 王剑, 余谦, 等. 富有机质黑色页岩形成环境及背景的元素地球化学反演——以渝东北地区田坝剖面五峰组—龙马溪组页岩为例[J]. 天然气工业, 2015, 35(4): 25-32. [Xiong Xiaohui, Wang Jian, Yu Qian, et al. Element geochemistry inversion of the environment and background of organic-rich black shale formation: A case study of the Wufeng-Longmaxi black shale in the Tianba section in northeastern Chongqing[J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(4): 25-32.]
- [27] Curtis J B. Fractured shale-gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1921-1938.
- [28] Bowker K A. Barnett shale gas production, fort worth Basin: issues and discussion[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 523-533.
- [29] 李钜源. 东营凹陷泥页岩矿物组成及脆度分析[J]. 沉积学报, 2013, 31(4): 616-620. [Li Juyuan. Analysis on mineral components and frangibility of shales in Dongying depression[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(4): 616-620.]
- [30] 李新景, 胡素云, 程克明. 北美裂缝性页岩气勘探开发的启示[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(4): 392-400. [Li Xinjing, Hu Suyun, Cheng Keming. Suggestions from the development of fractured shale gas in North America[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(4): 392-400.]
- [31] 任元, 赵红燕, 彭超, 等. 涪陵页岩气田高产要素分析[J]. 江汉石油科技, 2015, 25(2): 11-15. [Ren Yuan, Zhao Hongyan, Peng Chao, et al. FuLing shale productive factor analysis[J]. Jiangnan Petroleum Science and Technology, 2015, 25(2): 11-15.]
- [32] 杨宝刚, 潘仁芳, 刘龙, 等. 四川盆地长宁示范区地质条件对页岩有机质的影响[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(26): 35-41, 65. [Yang Baogang, Pan Renfang, Liu Long, et al. The influence of geological condition of Sichuan Basin Changning demonstration area on the development of organic matters in shale[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(26): 35-41, 65.]
- [33] 王亮, 陈云燕, 刘玉霞. 川东南彭水地区龙马溪组页岩孔隙结构特征[J]. 中国石油勘探, 2014, 19(5): 80-88. [Wang Liang, Chen Yunyan, Liu Yuxia. Shale porous structural characteristics of Longmaxi Formation in Pengshui area of Southeast Sichuan Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2014, 19(5): 80-88.]
- [34] 王行信, 韩守华. 中国含油气盆地砂泥岩黏土矿物的组合类型[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(4): 1-3, 11. [Wang Xingxin, Han Shouhua. The combination pattern of clay minerals of sandstone and mud rock in China's petroliferous basins[J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(4): 1-3, 11.]
- [35] 赵杏媛, 王行信, 张有瑜, 等. 中国含油气盆地粘土矿物[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1995: 36-49. [Zhao Xingyuan, Wang Xingxin, Zhang Youyu, et al. The clay minerals of oil-bearing basin in China[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1995: 36-49.]

- [36] 陈鑫, 钟建华, 袁静, 等. 渤南洼陷古近系高岭石发育特征及转化机理[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(4): 456-462. [Chen Xin, Zhong Jianhua, Yuan Jing, et al. Development and formation of Paleogene kaolinite, Bonan subsag[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(4): 456-462.]
- [37] 赵杏媛, 杨威, 杨帆, 等. 塔里木盆地粘土矿物[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2001: 33-62. [Zhao Xingyuan, Yang Wei, Yang Fan, et al. The clay minerals of Tarim Basin[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2001: 33-62.]
- [38] 冯爱国, 张建平, 石元会, 等. 中扬子地区涪陵区块海相页岩气层特征[J]. 特种油气藏, 2013, 20(6): 15-19. [Feng Aiguo, Zhang Jianping, Shi Yuanhui, et al. Characteristics of marine shale gas play in Fuling block in the middle Yangtze area[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2013, 20(6): 15-19.]
- [39] 蒋裕强, 张春, 邓海波, 等. 黏土矿物对低渗透致密砂岩储渗性能的影响[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2013, 35(6): 39-47. [Jiang Yuqiang, Zhang Chun, Deng Haibo, et al. Influences of clay minerals on physical properties of low permeability and tight sandstones[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2013, 35(6): 39-47.]
- [40] 程晓玲. 粘土矿物转化与储层孔隙演化的规律性研究——以苏北盆地台兴油田阜三段储层为例[J]. 大庆石油地质与开发, 2006, 25(1): 43-45. [Cheng Xiaoling. Laws of clay mineral transformation and reservoir porosity evolution: A case study of Fu III Member of Taixing oil field in Subei Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2006, 25(1): 43-45.]
- [41] 于川淇, 宋晓蛟, 李景景, 等. 长石溶蚀作用对储层物性的影响——以渤海湾盆地东营凹陷为例[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(6): 765-770. [Yu Chuanqi, Song Xiaojiao, Li Jingjing, et al. Impact of feldspar dissolution on reservoir physical properties: A case from Dongying sag, the Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(6): 765-770.]
- [42] 黄思静, 黄可, 冯文立, 等. 成岩过程中长石、高岭石、伊利石之间的物质交换与次生孔隙的形成: 来自鄂尔多斯盆地上古生界和川西凹陷三叠系须家河组的研究[J]. 地球化学, 2009, 38(5): 498-506. [Huang Sijing, Huang Keke, Feng Wenli, et al. Mass exchanges among feldspar, kaolinite and illite and their influences on secondary porosity formation in clastic diagenesis—A case study on the Upper Paleozoic, Ordos Basin and Xujiache Formation, western Sichuan depression[J]. Geochimica, 2009, 38(5): 498-506.]
- [43] Berger G, Lachapagne J C, Velde B, et al. Kinetic constraints on illitization reactions and the effects of organic diagenesis in sandstone/shale sequences[J]. Applied Geochemistry, 1997, 12(1): 23-35.

Mineralogical Characteristics and Petroleum Geological Significance of Wufeng-Longmaxi Formation Shale in the Tianba Area, Northeast of Chongqing

YANG YuNing^{1,2}, WANG Jian³, GUO XiuMei³, XIONG XiaoHui³

1. Chengdu University of Technology, Chengdu 610082, China

2. Research Institute of Geophysical Exploration Engineering Co., Ltd., Zhongcheng Coal Field, Chengdu 610072, China

3. Key Laboratory of Sedimentary Basin and Oil and Gas Resources, Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Ministry of Land and Resources PRC, Chengdu 610082, China

Abstract: Shale samples are from Wufeng-Longmaxi Formation of Tianba area in northeast of Chongqing. The results showed that major components of the Wufeng-Longmaxi Formation mud shale were composed of quartz, clay minerals and feldspar. In addition, other mineral components include Sulfide mineral like pyrite, gypsum and few carbonate. The mineral assemblage revealed that the Wufeng-Longmaxi Formation was composed of neritic shelf deposits that was in favor of the preservation and enrichment of organic matter and provided a good depositional condition for the shale gas reservoirs. Shale reservoir contained much quartz, and brittleness index was high that were conducive to form crack. Comparing adjacent Fuling area and Tianba area, we would find they were similar and the quartz and brittleness mineral content of Tianba shale was greater than that of the Fuling area, however, the clay minerals content and carbonate mineral content of Tianba shale was less than that of the Fuling area. Clay mineral compositions characterization reflected that Wufeng-Longmaxi Formation had already been in a phyllo-morphic stage and that was corresponding to a highly mature or postmature evolutionary stage of hydrocarbons and provided with a suitable maturity condition for shale gas formation. Moreover, the Wufeng Formation and Longmaxi Formation were highly poriferous and which provided a better place for the shale gas reservoirs.

Key words: shale gas; Wufeng-Longmaxi Formation; mineralogy; sedimentology; Northeast of Chongqing; Tianba area