

湘西北地区下志留统龙马溪组 页岩矿物成分特征及意义

刘亢¹, 曹代勇¹, 林中月¹, 王玉芳²

(1 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院; 2 中国地质调查局油气资源调查中心)

摘要 运用X射线全岩衍射和扫描电镜等技术,对湘西北地区下志留统龙马溪组的页岩矿物组成进行了定性和定量分析。龙马溪组页岩主要矿物成分是石英(48.1%)、黏土矿物(34.0%)和长石(11.5%),且含有少量方解石、白云石和黄铁矿等;黏土矿物呈伊利石、有序的伊/蒙混层和少量绿泥石以及微量高岭石的组合特征,其中伊利石和伊/蒙混层含量较高,分别达到64.7%和21.7%,反映出龙马溪组页岩达到晚成岩作用阶段。龙马溪组处于浅水陆棚向深水陆棚过渡的沉积环境,页岩有机质易于富集和保存。页岩岩心样品脆性矿物含量分布在34.4%~79.6%之间,平均脆性指数达65.4%,具备较好的压裂改造条件。与周边焦石坝页岩气田等相比,龙马溪组页岩矿物组成具有相似性,反映湘西北具备页岩气勘探开发的地质潜力。

关键词 湘西北; 志留纪; 龙马溪组; 页岩气; 矿物成分

中图分类号: TE132.2

文献标识码: A

目前国内页岩气勘探开发取得了巨大突破,已发现焦石坝、长宁—昭通、威远、富顺—永川等4个千亿立方米级大气田,2015年已建成 $75 \times 10^8 \text{ m}^3$ 产能,累计生产页岩气 $60.55 \times 10^8 \text{ m}^3$,页岩气已成为中国非常规油气的重要组成部分,这其中的产量和探明地质储量全部来自四川盆地古生界海相沉积的五峰组—龙马溪组^[1-2]。前期勘查研究表明,湘西北地区下志留统龙马溪组页岩的沉积演化过程与四川盆地内的龙马溪组具有相似性,具备一定的页岩气资源潜力,国土资源部已将该区作为重点区块在国内招标进行勘探开发^[3-5]。

页岩矿物成分中的脆性矿物是控制页岩裂缝发育程度的主要内在因素^[6-7],而黏土矿物是有机质富集和气体吸附存储、运移的重要影响因素^[8]。在页岩气评价中,常把寻找有机质和硅质含量高、黏土矿物含量低(通常低于50%^[6])、裂缝发育的脆性烃源层作为勘探重点,由于在这类储层中容易得到更大的储层改造体积和更高的经济效益^[9-10],因而页岩矿物成分的分析对页岩气资源评价和储层改造能力的研

究具有重要意义。

目前,多家单位已在湘西北地区龙马溪组部署了参数井和测试工作,并对区块资源潜力进行了初步评价,但对储层矿物成分特征方面的研究较少,尚缺乏系统的分析。本文通过X射线衍射、氩离子抛光扫描电镜等实验技术,以湘西北地区龙马溪组实钻岩心和野外剖面样品为依据,与邻区进行对比,分析其矿物成分特征及意义,并对其沉积环境、成岩阶段及可改造性进行分析,以此为资源潜力评价提供基础信息。

1 区域地质背景

湘西北地区分布有来凤、咸丰、鹤峰、龙山、桑植、永顺、保靖等多个页岩气探矿权区块,在大地构造上处于四川盆地与雪峰山隆起之间(图1),属于湘鄂西隔槽式褶皱带,研究区控制性构造为北北东向褶皱,褶皱变形强烈,两翼倾角变化大,龙马溪组在背斜区大部分被剥蚀,有利页岩段多保存在向斜中。

收稿日期: 2016-12-13; 改回日期: 2017-11-30

本文受中国地质调查局项目“页岩气有利区块调查与优选评价”(编号: 12120114054101)资助

刘亢: 1985年生,中国矿业大学(北京)在站博士后,现从事非常规油气地质研究工作。通讯地址: 100083 北京市海淀区学院路丁11号; E-mail: liukangluck@163.com

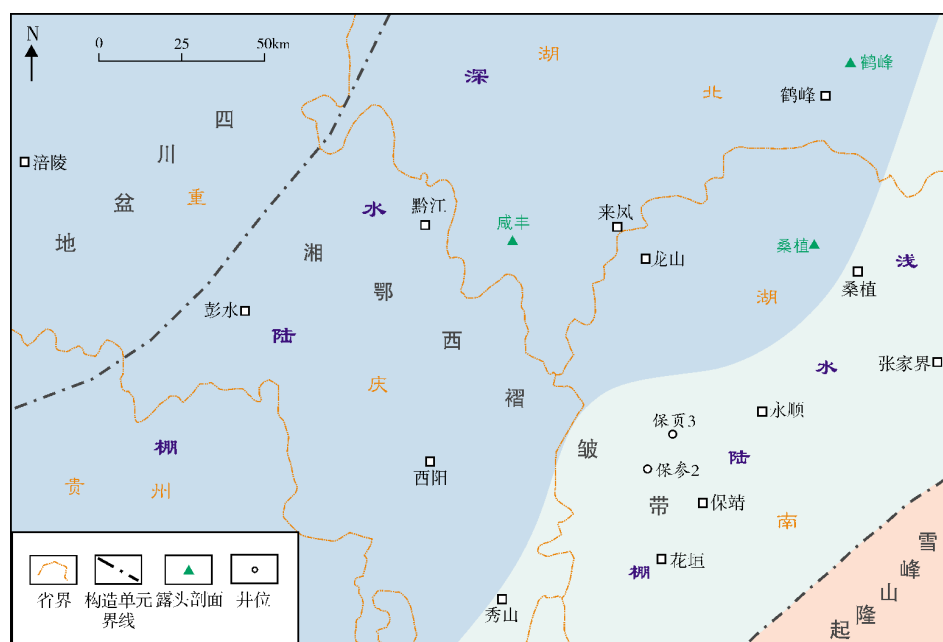


图1 湘西北地质背景及取样点位置

区内龙马溪组整体覆盖于中奥陶统宝塔组之上,并与其假整合接触。晚奥陶世—早志留世是中扬子区古地理格局的重大变革期:晚奥陶世中上扬子区东南缘与华夏板块聚合,褶皱造山,形成水下隆起;受其控制,湘西北地区龙马溪期处于深水陆棚向浅水陆棚过渡的沉积环境中(图1),并以浅水陆棚相沉积为主^[11-12],根据钻井揭示的岩性、岩相和生物特征,可划分出砂泥质浅水陆棚、泥质浅水陆棚、硅质深水陆棚、泥质深水陆棚等四类(图2),富有机质页岩段集中在下部的深水陆棚沉积相中。

龙马溪组以富含碳质、硅质的页岩为特征,成层薄,多为片状页岩,水平纹层发育,颜色呈黑色、褐黑色,常见黄铁矿结核(图3a,3b)和碳酸盐矿物条带(图3c),富含笔石化石(图3d),钻井揭示有气显示的页岩厚度为50~90 m,富有机质段主要集中在下部的深水相中,厚度相对较小,仅为8~13 m。

2 样品采集及测试

本次研究采集了钻井岩心和剖面露头样品,包括保页3井、保参2井以及鹤峰、咸丰、桑植等露头(位置见图1)。保参2井取样点埋深880~922 m,计25个样品;保页3井主要取样点埋深950~990 m(参见图2),计20个样品;鹤峰露头样品21个;咸丰露头样品20个;桑植露头样品31个。样品数据的采集范围比较广

泛,能较全面地反映研究区龙马溪组的矿物组成特征。采用“沉积岩中黏土矿物和常见非黏土矿物X衍射分析方法(SY/T5163-2010)”,重点进行X射线衍射实验分析,同时开展了氩离子抛光扫描电镜分析。

3 测试结果

3.1 全岩矿物分析结果

全岩X衍射分析表明(表1),研究区龙马溪组页岩矿物成分较为复杂。本次研究注意到风化作用对矿物组成具有一定影响:所有岩心样品、露头样品中均发现有石英、黏土矿物和长石;碳酸盐矿物在大多数钻井岩心样品中有发现,而在露头样品中仅少量样品有显示;黄铁矿在大多数钻井岩心样品中有发现,而在露头样品中仅部分有显示。

由表1可见,石英含量平均为48.1%,其中钻井岩心平均42.0%,露头平均54.3%;黏土矿物含量平均为34.0%,钻井岩心与露头相差不大;长石类的钾长石与斜长石平均含量为11.5%,其中钻井岩心平均14.3%,露头平均8.7%;碳酸盐类的方解石与白云石平均为3.9%,其中钻井岩心平均6.8%,露头平均1.1%;黄铁矿平均为2.2%,其中钻井岩心平均3.5%,露头平均0.9%;菱铁矿含量极少,平均含量为0.3%。

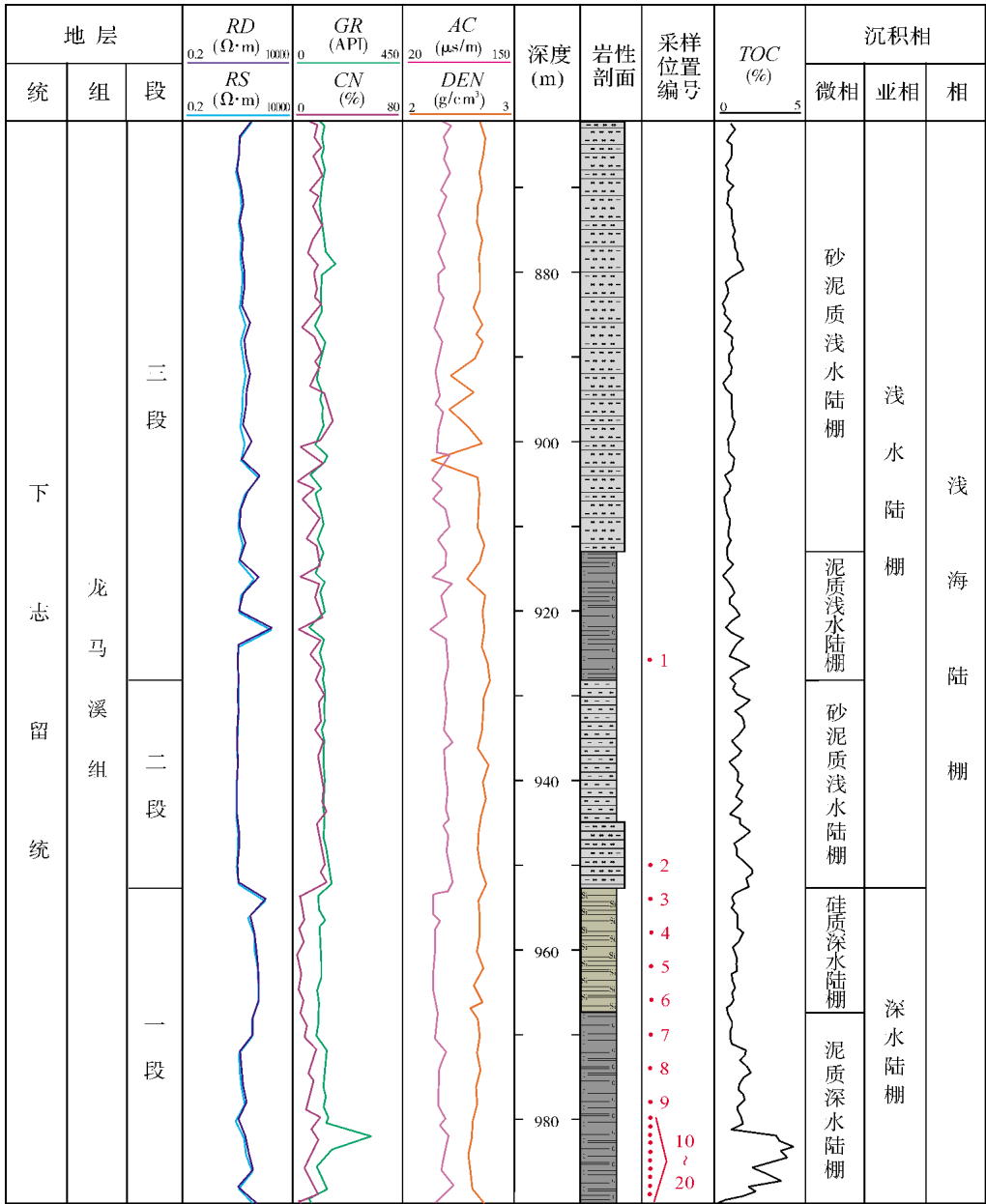


图 2 湘西北保页 3 井下志留统龙马溪组综合柱状图及取样位置

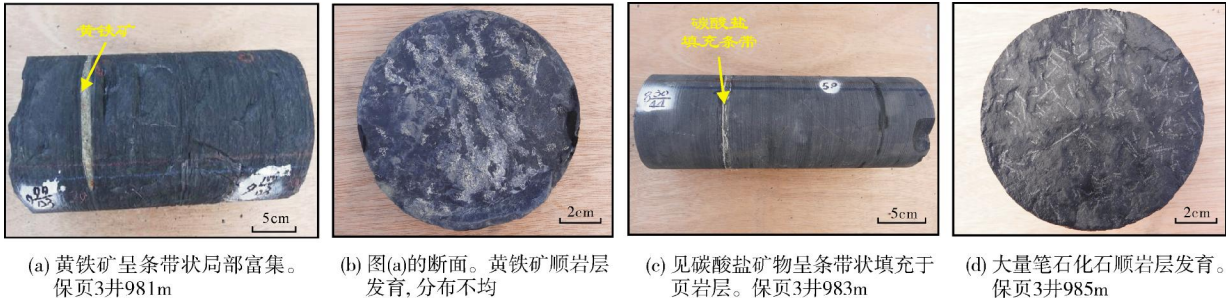


图 3 湘西北地区下志留统龙马溪组碳质页岩岩心特征

表1 湘西北地区下志留统龙马溪组页岩样品全岩X衍射定量分析结果

矿物含量(%)

采样点	总样品数	石英			钾长石			斜长石			方解石		
		平均值	范围值	样品数	平均值	范围值	样品数	平均值	范围值	样品数	平均值	范围值	样品数
保参2井	25	39.0	31.0~46.7	25	4.7	2.3~9.1	25	10.0	4.6~16.2	25	3.0	0~10.3	23
保页3井	20	44.9	23.3~75.8	20	3.3	0.5~7.8	20	10.5	2.7~24.2	20	2.9	0~11.4	18
岩心平均(%)		42.0			4.0			10.3			3.0		
鹤峰剖面	21	59.8	35.1~92.8	21	1.7	0~4.0	3	5.5	1.0~15.3	21	0	0	0
咸丰剖面	20	46.6	38.1~57.0	20	3.2	1.0~6.1	20	8.5	3.2~18.9	20	0.6	0~4.1	4
桑植剖面	31	56.6	37.8~91.2	31	长石:平均7.3%,范围1.0%~20.1%,样品31个						0.2	0~7.5	1
露头平均(%)		54.3			8.7						0.3		
总平均(%)		48.1			11.5						1.6		
采样点	总样品数	白云石			黄铁矿			菱铁矿			黏土矿物		
		平均值	范围值	样品数	平均值	范围值	样品数	平均值	范围值	样品数	平均值	范围值	样品数
保参2井	25	5.2	2.2~10.7	25	4.3	0.8~15.6	25	0.5	0~1.5	13	33.3	26.6~42.2	25
保页3井	20	2.4	0~16.7	16	2.6	0~8.6	18	0.3	0~1.0	11	33.1	15.2~62.4	20
岩心平均(%)		3.8			3.5			0.4			33.2		
鹤峰剖面	21	0.1	0~2.6	2	0.6	0~4.9	6	0.1	0~0.7	3	32.2	6.2~57.8	21
咸丰剖面	20	2.0	0~18.9	4	1.3	0~10.0	10	0.1	0~1.0	4	37.7	16.2~54.8	20
桑植剖面	31	0.4	0~13.7	1	0.7	0~9.5	6	0.1	0~0.8	2	34.7	7.8~54.5	31
露头平均(%)		0.8			0.9			0.1			34.9		
总平均(%)		2.3			2.2			0.3			34.0		

以保页3井为例,石英和黏土矿物含量在垂向上由顶部至底部(样品编号增大)均有增加趋势(图4a),但趋势不显著;长石类矿物含量为减少趋势,趋势比较明显;碳酸盐类矿物含量波动变化,局部很富集;其他矿物含量变化趋势不明显。

3.2 黏土矿物分析结果

本区龙马溪组页岩样品中,黏土矿物成分包括伊利石、伊/蒙混层、绿泥石和少量高岭石(参见图4b),以伊利石和伊/蒙混层为主。以保页3井为例,由顶部至底部伊利石含量有增大的趋势,伊/蒙混层含量有减小趋势(图4b),但趋势不明显。伊利石和伊/蒙混层在钻井岩心样品中,二者的平均含量分别占黏土矿物总量的64.7%和21.7%,而在露头样品中则分别为54.5%、33.0%;绿泥石含量较低,在岩心样品和露头样品中差别不大,平均占黏土矿物的9.3%;岩心样品中还检测到非常少的高岭石,含量为

0.8%,但存在较为广泛,样品中均有发现。样品中均未检测到蒙脱石,表明其含量很低,可能大部已转化为伊/蒙混层和伊利石。总体上,钻井样品与露头样品的黏土成分及含量比例相似。

3.3 风化作用对矿物成分的影响

由于岩心样品和露头样品的赋存状态存在着差异,风化作用对露头样品的矿物组成有一定影响。如表1所示,由于石英矿物抗风化能力较强,在露头样品中石英平均含量为54.3%,大于岩心中的42.0%;长石类矿物受一定的风化作用影响,但在所有露头样品中仍然存在,只是所占比例有所降低;碳酸盐矿物受风化作用影响严重,一方面仅个别露头样品(约占总样品的9.7%)含碳酸盐矿物,另一方面,露头样品中碳酸盐矿物平均含量为1.1%,也远小于岩心样品中的6.8%。黏土矿物的总量(表1)以及矿物的类型和各类型的相对含量变化不大(图4)。

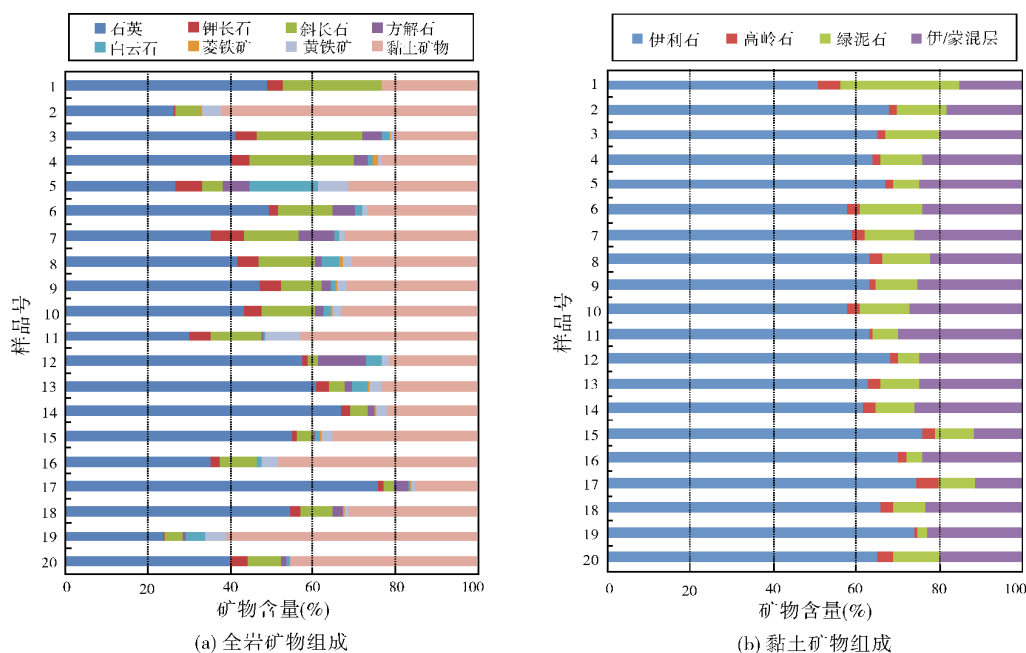


图 4 湘西北保页 3 井下志留统龙马溪组页岩矿物成分相对含量

取样位置及样品编号参见图 2

4 讨论

4.1 矿物成分与沉积环境

中国南方下志留统龙马溪组的黑色—灰黑色页岩属于典型的海相水生有机质富集层,是重要的烃源岩层系。四川盆地的早志留世主要为浅海—深水盆地沉积环境^[13-14],而研究区正处于四川盆地的西南缘。在所测试样品中,尤其是龙马溪组上部样品,显示出碎屑状石英平均含量很高,分选较差,磨圆中等,呈棱角—次棱角状等特征,见有层状有机

质(图5a),黏土矿物多呈鳞片状(图5b),成分主要为伊利石,但也发现有自生矿物白云石(图5c,5d)和方解石,反映了沉积环境为整体安静但也有少量陆源碎屑的浅水陆棚环境;龙马溪组底部的样品发育大量笔石化石(图3d),硅质含量较高,且石英、长石呈零星状漂浮于黏土矿物中,这反映了沉积环境为相对安静的深水陆棚环境;同时在样品中广泛存在黄铁矿等多种金属硫化物(图5b),表明龙马溪组处于较稳定的还原沉积环境中,这对有机质的富集和保存有利,可为页岩气藏的形成和演化提供良好的沉积条件。

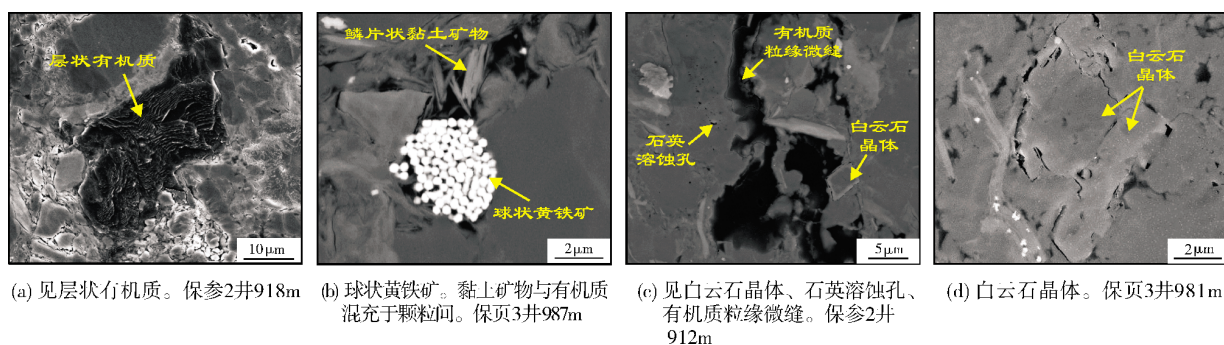


图 5 湘西北地区下志留统龙马溪组碳质页岩扫描电镜特征

4.2 矿物成分与成岩阶段

按照伊/蒙混层、黏土矿物组合类型和伊利石结

晶度的划分标准,并对比有机质的成熟度,可将碎屑岩成岩作用阶段划分为早期、中期、晚期和极低级变质作用期 4 个阶段^[15-16]。研究区样品中伊利石是含

量最高的黏土矿物(59.6%),表明龙马溪组已经历晚成岩作用阶段;伊/蒙混层在样品中广泛存在(27.3%),间层比大多数在12%左右,说明尚未达到极低级变质作用阶段;此外样品中均存在低含量的绿泥石(9.3%)和极低含量的高岭石(0.8%),这些构成了伊利石+有序的伊/蒙混层+绿泥石+高岭石的黏土矿物组合类型,按黏土矿物的分带特点及其与成岩阶段的关系^[15-16],龙马溪组黑色页岩已达到晚成岩阶段。根据马力等^[17]的研究成果,晚成岩作用阶段对应有机质演化的成熟—高成熟阶段(R_o 为1.0%~2.6%),龙马溪组矿物成分所反映的成熟度表明,研究区龙马溪组具有适宜的页岩气成熟度条件。

4.3 矿物成分与脆性指数

脆性矿物是页岩储层进行压裂改造的关键因素。研究表明,来自生物硅酸盐的石英和碳酸盐的方解石对岩石脆性有重要贡献,脆性矿物含量高、黏土矿物含量低的页岩中,易形成网状裂缝,可增大压裂改造体积,美国Barnett页岩的脆性及其对压裂增产措施的

积极响应,证明这是非常重要的因素^[18-20]。研究区龙马溪组页岩样品中脆性矿物主要发育石英、长石、方解石、白云石,脆性矿物总含量为32.7%~83.8%,按“脆性指数=(石英+长石+方解石+白云石)/(石英+长石+方解石+白云石+黏土矿物) $\times 100\%$ ”^[21-22]计算,研究区页岩样品的脆性指数为:岩心样品平均65.4%,露头样品平均64.7%,考虑到风化作用,以岩心样品为例,范围为34.4%~79.6%,这说明研究区页岩具备商业开发条件(石英等脆性矿物的含量一般高于40%^[15-16]),这也反映出研究区页岩储层具备良好的压裂改造潜力。

4.4 矿物成分与周边地区对比

与周边地区龙马溪组页岩的矿物组分相比(表2),研究区在黏土矿物含量、脆性矿物含量比例及矿物组成上^[2,23-26]都具有相似的特征,其中与焦石坝和彭水地区的矿物组成比例更为相似,这也反映出研究区龙马溪组页岩在矿物组成上具备较好的可改造潜力和页岩气开采条件。

表2 研究区与周边地区龙马溪组页岩主要矿物平均含量对比

地区	样品来源	层位	黏土矿物	石英	长石	白云石	方解石	黄铁矿	数据来源
焦石坝	焦页1井	五峰组—龙马溪组	34.6	44.4	8.3	5.9	3.8	少量	文献[23]
长宁	长芯1井	龙马溪组	40.1	33.2	6.1	10.2	6.5	4.7	文献[24]
彭水	鹿角剖面	龙马溪组	33.8	44.2	14.1	6.1(白云石+方解石)		1.8	文献[25]
川南	岩心、剖面	龙马溪组	30.3	42.3	8.9	16.8(白云石+方解石)		1.4	文献[26]
湘西北	岩心	龙马溪组	33.2	42.0	14.3	3.8	3.0	3.5	本文
	剖面	龙马溪组	34.9	54.3	8.7	0.8	0.3	0.9	本文

5 结论

(1)湘西北地区下志留统龙马溪组海相页岩的矿物成分较为复杂,主要矿物成分是石英、黏土矿物、长石,平均含量分别是48.1%、34.0%、11.5%,含少量方解石和白云石,部分样品中含有少量黄铁矿、菱铁矿等其他矿物。黏土矿物中伊利石和伊/蒙混层含量较高,分别达到64.7%和21.7%,页岩处于晚成岩作用阶段。

受风化作用等影响,研究区龙马溪组页岩露头样品的矿物含量与岩心样品存在差异。其中:石英、黏土矿物受影响较小,含量变化不大;长石类矿物受一定影响,在露头中含量降低;黄铁矿与碳酸盐矿物

受影响严重,在露头中含量大幅度降低,甚至完全被风化分解。

(2)研究区龙马溪组页岩岩心样品脆性矿物含量为34.4%~79.6%,平均脆性指数65.4%,具备较好的页岩气储集层压裂改造条件。

(3)研究区龙马溪组页岩矿物组成与周边焦石坝等页岩气田具有相似的特征,反映出研究区具备页岩气勘探开发的地质潜力。

参考文献

- [1] 董大忠,邹才能,戴金星,等.中国页岩气发展战略对策建议[J].天然气地球科学,2016,27(3):397-406.
- [2] 张晓明,石万忠,徐清海,等.四川盆地焦石坝地区页岩气储层特征及控制因素[J].石油学报,2015,36(8):926-939.

- [3] 李笑天,潘仁芳,鄢杰,等. 四川盆地长宁—威远页岩气示范区下志留统龙马溪组泥页岩吸附特征及影响因素分析[J]. 海相油气地质, 2016, 21(4): 60-66.
- [4] 邹才能,董大忠,王玉满,等. 中国页岩气特征、挑战及前景(二)[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(2): 166-178.
- [5] 陈波,皮定成. 中上扬子地区志留系龙马溪组页岩气资源潜力评价[J]. 中国石油勘探, 2009, 14(3): 15-19.
- [6] Bowker K A. Barnett shale gas production, Fort Worth Basin: Issues and discussion[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 523-533.
- [7] Ross D J K, Bustin R M. The importance of shale composition and pore structure upon gas storage potential of shale gas reservoirs[J]. Marine and Petroleum Geology, 2009, 26(6): 916-927.
- [8] 王茂桢,柳少波,任拥军,等. 页岩气储层黏土矿物孔隙特征及其甲烷吸附作用[J]. 地质论评, 2015, 61(1): 207-216.
- [9] 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.
- [10] 伍岳,樊太亮,蒋恕,等. 四川盆地南缘上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组页岩矿物组成与脆性特征[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(4): 59-63.
- [11] 文玲,胡书毅,田海芹. 扬子地区志留纪岩相古地理与石油地质条件研究[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(6): 11-14.
- [12] 朱志军,陈洪德. 川东南地区早志留世晚期沉积特征及沉积模式分析[J]. 中国地质, 2012, 39(1): 64-76.
- [13] 张春明,张维生,郭英海. 川东南—黔北地区龙马溪组沉积环境及对烃源岩的影响[J]. 地学前缘, 2012, 19(1): 136-145.
- [14] 王燕,冯明刚,魏祥峰,等. 涪陵气田焦石坝区块页岩气储层储集空间特征及其定量评价[J]. 海相油气地质, 2016, 21(1): 29-34.
- [15] 任磊夫, 陈芸菁. 从黏土矿物的转变讨论沉积成岩到变质过程中的阶段划分[J]. 石油与天然气地质, 1984, 5(4): 326-333.
- [16] 刘伟新,王延斌,秦建中. 川北阿坝地区三叠系黏土矿物特征及地质意义[J]. 地质科学, 2007, 42(3): 469-482.
- [17] 马力,陈焕疆,甘克文,等. 中国南方大地构造和海相油气地质:上册[M]. 北京:地质出版社, 2004: 259-364.
- [18] Curtis J B. Fractured shale-gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1921-1938.
- [19] Jarvie D M, Hill R J, Ruble T E, et al. Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 475-499.
- [20] Bowker K A. Recent developments of the Barnett Shale play, Fort Worth Basin[J]. West Texas Geological Society Bulletin, 2003, 42(6): 4-11.
- [21] 范卓颖,林承焰,王天祥,等. 致密地层岩石脆性指数的测井优化建模[J]. 石油学报, 2015, 36(11): 1411-1420.
- [22] 蒋裕强,董大忠,漆麟,等. 页岩气储层的基本特征及其评价[J]. 天然气工业, 2010, 30(10): 7-12.
- [23] 郭彤楼, 刘若冰. 复杂构造区高演化程度海相页岩气勘探突破的启示——以四川盆地东部盆缘 JY1 井为例[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(4): 643-651.
- [24] 陈文玲,周文,罗平,等. 四川盆地长志 1 井下志留统龙马溪组页岩气储层特征研究[J]. 岩石学报, 2013, 29(3): 7-11.
- [25] 李娟,于炳松,刘策,等. 渝东南地区黑色页岩中黏土矿物特征兼论其对储层物性的影响——以彭水县鹿角剖面为例[J]. 现代地质, 2012, 26(4): 732-740.
- [26] 王秀平,牟传龙,葛祥英,等. 川南及邻区龙马溪组黑色岩系矿物组分特征及评价[J]. 石油学报, 2015, 36(2): 150-162.

编辑:董庸

Characteristics and Significance of Mineral Compositions of Shale in Lower Silurian Longmaxi Formation, Northwestern Hu'nan

Liu Kang, Cao Daiyong, Lin Zhongyue, Wang Yufang

Abstract: Using X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM) techniques, the qualitative and quantitative analyses of the mineral composition of shale in the Lower Silurian Longmaxi Formation in northwestern Hu'nan were conducted. The main mineral components of the shale are quartz (48.1%), clay minerals (34.0%), and feldspar (11.5%), containing small amounts of calcite, dolomite, and pyrite. The content of illite and illite/montmorillonite mixed layer in clay minerals is relatively high, averaging 64.7% and 21.7% respectively. The clay mineral is the combination of illite, ordered illite/montmorillonite, and a small amount of chlorite and trace kaolinite, reflecting that the Longmaxi Formation shale reached the stage of late diagenesis. In a transitional sedimentary environment from shallow-water to deep-water continental shelf, the shale organic matter of Longmaxi Formation is easy to be enriched and preserved. The content of brittle minerals in shale core samples ranged from 34.4% to 79.6%, and the average brittleness index reached 65.4%, showing a good condition for fracturing transformation. Compared with the surrounding Jiaoshiba shale gas field, the composition of the shales in the Longmaxi Formation is similar, reflecting the geological potential of shale gas in northwestern Hu'nan.

Key words: Silurian; Longmaxi Formation; Shale gas; Mineral composition; Northwestern Hu'nan

Liu Kang: Postdoctoral researcher at China University of Mining & Technology(Beijing). Add: No.11 Xueyuan Road, Haidian District, Beijing 100083, China