

doi:10.3969/j.issn.1007-3701.2016.02.009

湖南涟源凹陷下石炭统测水组泥页岩矿物组成 与脆性特征研究

王 强, 白云山, 苗凤彬

WANG Qiang, BAI Yun-Shan, MIAO Feng-Bin

(中国地质调查局武汉地质调查中心, 武汉 430205)

(Wuhan Center of China Geological Survey, Wuhan 430205, China)

摘要:应用 X 射线衍射(XRD)分析技术对湖南涟源凹陷石炭系测水组泥页岩进行矿物组成与脆性特征研究。结果表明,涟源凹陷石炭系测水组泥页岩中矿物成分复杂,石英含量最高,平均 72.61%,粘土矿物含量次之,平均 19.46%,含有少量的长石、白云石、黄铁矿和方解石,平均质量分数分别为 4.02%、4.75%、2.01%和 1.66%。总体来说,该地区石炭系测水组页岩的矿物组成特征与北美 woodforth 页岩比较相似。涟源凹陷测水组页岩中脆性矿物丰富、含量高,脆性指数平均 0.8。研究表明涟源凹陷测水组泥页岩整体上具有良好的脆性特征,有利于该区页岩气的压裂改造。

关键词:涟源凹陷;测水组;矿物组成;脆性特征;页岩气

中图分类号:P534.45,P618.13

文献标识码:A

文章编号:1007-3701(2016)02-166-06

Wang Q, Bai Y S, Miao F B. Study on Mineral Composition and Brittleness Characteristics of the Ceshui Formation Shale in Lianyuan Depression. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2016, 32(2):166-171.

Abstract: The mineral composition and brittleness characteristics of the Ceshui formation in Lianyuan depression were studied by X-ray diffraction (XRD) in this paper. The results showed that the Ceshui Formation in Lianyuan depression has complexed mineral composition. The quartz content is most abundant, average of 72.61%, respectively the minor component is clay, average of 19.46%. In addition, there are other small amount of mineral components, including pyrite, feldspar, dolomite, with an average content of 4.02%, 4.75%, 2.01% and 1.66%. In general, the mineral composition characteristics of the Ceshui Formation in Lianyuan sag are similar to Woodforth shale in the North America. The Ceshui Formation shale in Lianyuan sag has high contents of brittle minerals. The average value of brittleness index is 8. It is suggested that the Ceshui Formation organic-rich in Lianyuan sag has favourable brittleness characteristics, and is beneficial to fracturing of shale gas.

Key words: Lianyuan depression; Ceshui Formation; shale mineral composition; brittleness characteristics; shale gas

收稿日期:2016-3-24;修回日期:2016-4-22.

基金项目:中国地调局地质矿产调查评价专项项目“湘中坳陷页岩气资源远景调查”(编号:12120114049701).

第一作者:王 强(1981—),男,助理研究员,目前从事页岩气地质资源评价工作,E-mail:wanggeomath@sina.com.

近年来,随着能源需求的增加和天然气勘探理论、技术的发展,页岩气作为新兴的非常规能源日益受到国内外众多专家学者的关注。国土资源部最新公布的全国页岩气资源潜力调查评价结果显示,中国页岩气可采储量约为 $25.08 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[1]。2012 年中石化在涪陵焦石坝构造位置部署的焦页 1 井成功钻探,发现了中国首个大型页岩气田,目前已经形成产能^[2]。

页岩气与常规油气系统不同,为典型的自生自储、原地成藏模式,主要以游离态和吸附态方式赋存于富有机质泥页岩中^[3-5]。泥页岩既是烃源岩,又是储集层,页岩中的矿物直接控制页岩孔隙和微构造的发育,对页岩含气性和储集物性具有重要影响^[6]。泥页岩矿物组分对有机质烃源岩的生烃模式和排烃效率有着重要影响^[7],脆性矿物的分布直接控制页岩孔隙和微构造的发育,决定着页岩气的储集空间和渗流通道^[8-9]。

泥页岩中矿物组分的研究对页岩气成藏机理、资源评价以及工业开采均有重要意义。涟源凹陷测水组发育良好的富有机质泥页岩,具有广阔的页岩气资源评价前景,通过对测水组泥页岩样品开展 X 射线衍射实验(XRD),对测水组泥页岩的矿物组分开展系统分析,为该地区的页岩气资源评价和勘探开发提供理论依据。

1 区域地质概况

涟源凹陷位于雪峰构造带东缘,是一个在前泥盆系浅变质基础上发展起来的一个继承性的沉积盆地,发育中泥盆统至下三叠统碳酸盐岩夹碎屑岩海相建造,局部残存下侏罗统和上白垩统陆相地层,面积约为 6770 km^2 ^[10]。从上古生界盖层沉积后,其构造变形主要经历了海西运动、印支运动、燕山运动、喜山运动以及新构造运动等大的构造阶段。凹陷四周均为隆起,其中西部为雪峰隆起、北部为沅山凸起、东部和衡阳盆地西肩隆起相邻、南部为龙山—白马山凸起,凹陷内按构造样式可分成西部叠瓦逆掩冲断带、中部褶断带和东部滑覆叠瓦冲断带三个构造单元^[11](图 1)。

涟源凹陷下石炭统测水组岩性特征比较稳定,为一套海陆过渡相的陆源碎屑含煤层系,是中国南方早石炭世重要的含煤建造,主要发育滨岸泻湖或沼泽相,泥页岩累计厚度可达 100 多米^[12]。根据岩性岩相特征及含煤特征,测水组可分为上下两段,下段由灰色、灰白色石英砂岩、灰黑色粉砂岩和泥岩组成,夹多个煤层,含有较多的菱铁矿层和菱铁矿结核;上段由灰白色石英砂岩、砂质砾岩、灰色粉砂岩、页岩和石灰岩等组成^[13]。

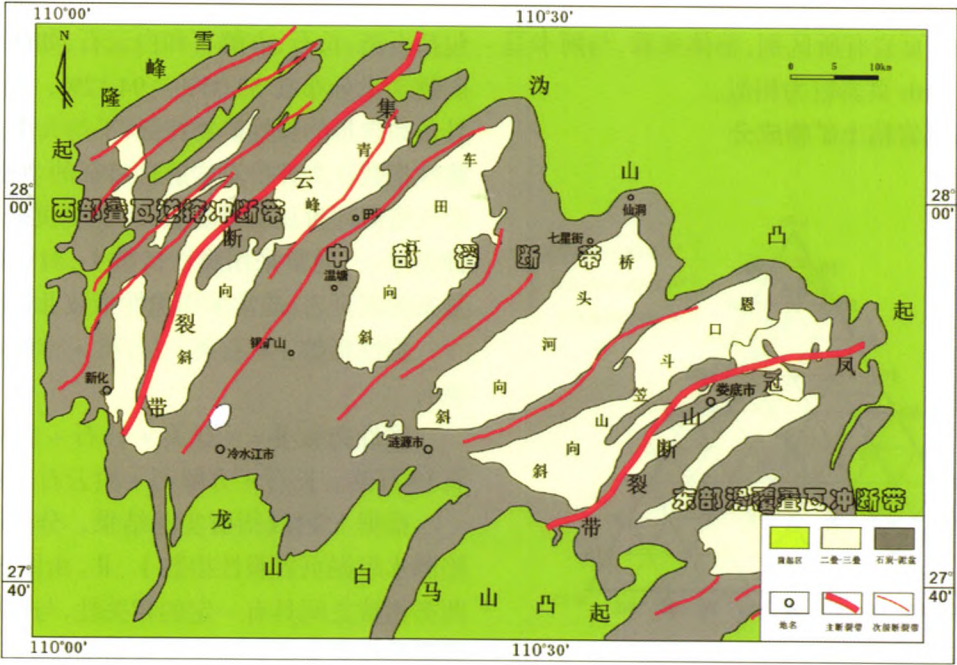


图1 涟源凹陷构造格局与邻区位置简图

Fig.1 Tectonic framework and adjacent area location of Lianyuan depression

2 泥页岩矿物成分

2.1 测水组泥页岩全岩矿物成分

涟源凹陷下石炭统测水组为一套碎屑岩为主的滨岸泻湖和沼泽沉积,主要岩性以粉砂岩、砂质泥岩、炭质泥岩为主。从湘中涟源凹陷测水组泥页岩样品的 X 射线衍射分析结果来看,下石炭统测水组泥页岩的矿物成分复杂。泥页岩样品中含有石英、长石、白云石、黄铁矿、方解石等脆性碎屑矿物,还含有粘土矿物。

根据涟源凹陷测水组矿物成分 X 射线衍射实验分析结果来看(表 1),泥页岩中的矿物组分以石英和粘土矿物为主。其中石英矿物的含量最高,最高可以达到 87.72%,最低的也有 51.80%,平均 72.61%。粘土矿物含量最低 3.42%,最高 43.50%,平均达到 19.46%。

泥页岩中其余矿物组分较少,长石含量 1.23%~9.27%,平均 4.02%;方解石含量 0.95%~3.3%,平均 1.66%;黄铁矿含量 0.85%~6.11%,平均 2.01%;白云石含量 0.91%~9.66%,平均 4.75%;另外其余矿物如菱铁矿等含量更少,平均不到 4%。

将涟源凹陷测水组泥页岩样品的矿物组成含量与北美阿卡马盆地 Woodford 页岩、福特沃斯盆地 Barnett 页岩进行了对比^[4,14](图 2),涟源凹陷测水组泥页岩矿物石英含量相对较高,分布区域与福特沃斯 Barnett 页岩有所区别,整体来看,与阿卡马盆地的 Woodford 页岩较为相似。

2.2 测水组泥页岩粘土矿物成分

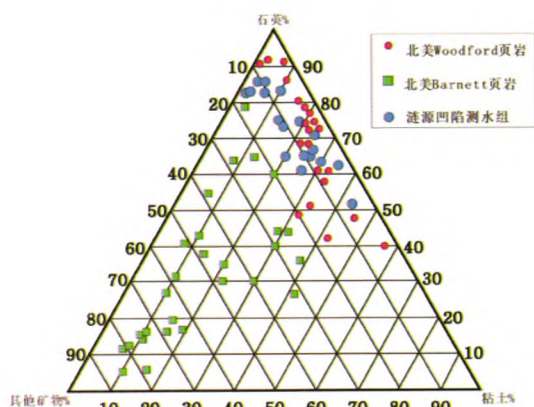


图2 涟源凹陷测水组页岩矿物组成

Fig.2 Mineral composition of the Ceshui Formation shale in Lianyuan depression

粘土矿物对页岩气的形成主要有两个作用:一是吸附有机质,对烃源岩中有机质的富集程度起重要作用;二是在有机质向烃类物质转化过程中起催化作用^[15]。在对泥页岩进行 X 射线衍射全岩矿物实验分析基础上,对样品的粘土矿物成分相对含量也进行了实验测试。表 1、图 3 粘土矿物成分定量分析结果表明,涟源凹陷下石炭统测水组泥页岩样品的粘土矿物主要是伊利石、伊蒙混层、高岭石和绿泥石,个别样品含有少量蒙皂石。样品的粘土矿物含量中伊利石含量最高,分布范围 28%~60%,平均为 37.44%,其次为伊蒙间层(混层),含量分布范围 13%~59%,平均 30.11%,高岭石的含量为 6%~50%,平均 23.44%,绿泥石含量较低,2%~16%,平均只有 7.11%。

3 泥页岩脆性特征分析

泥页岩脆性矿物含量是影响页岩基质孔隙和微裂缝发育程度、含气性及压裂改造方式等因素^[16]。富含石英、方解石等脆性矿物的泥页岩在外部应力作用下产生裂缝,成为重要页岩气流体通道^[17],具备商业开发条件的页岩脆性矿物含量一般高于 40%,粘土矿物含量小于 30%^[13-14]。当石英含量在 20%以上时,页岩就具有良好的压裂性,岩石脆性越高,压裂效果越好^[18]。

涟源凹陷测水组泥页岩样品中脆性矿物主要包括石英、长石、方解石和白云石,如图 4 所示脆性矿物含量分布在 53.03%~94.12%,平均 75.32%,具备高含量的脆性矿物特征(平均大于 50%)。页岩脆性指数作为评价页岩脆性特征的主要参数,对页岩气资源评价具有重要意义。北美页岩的脆性矿物种类单一,通常采用脆性指数 I,对于矿物成分较复杂的泥页岩,通常采用脆性指数 II 评价。

脆性指数 I = 石英 / (石英 + 方解石 + 粘土矿物);

脆性指数 II = (石英 + 长石 + 方解石 + 白云石) / (石英 + 长石 + 方解石 + 白云石 + 粘土矿物)。

根据 X 射线衍射实验结果,分别计算涟源凹陷测水组泥页岩脆性指数 I、II。由图 5 可以看出,两类指数之间具有一定的相关性,与国内学者对两类脆性指数关系的研究大致相符^[6]。

基于涟源凹陷测水组泥页岩矿物成分复杂,本文采用脆性指数 II 进行页岩脆性评价。计算结果表

表1 涟源凹陷测水组矿物成分X射线衍射实验分析结果

Table.1 Experimental results of mineral contents of the Ceshui Formation in Lianyuan depression by XRD Analysis

样品编号	全岩矿物 (%)								粘土矿物 (%)										脆性 指数 (%)
	石英	长石	方解石	硬石膏	黄铁矿	白云石	其他	粘土	蒙皂 石	伊蒙 间层	伊利 石	高岭 石	绿泥 石	绿蒙 间层	伊蒙 间层 比	绿蒙 间层 比	混层 比	脆性矿 物含量	
LYC1-1	65.74	9.27	1.06	微量	1.85	微量	1.59	20.51	23	34	30	9	4	0	20	0	0	76.07	78.76
LYC1-2	65.04	1.58	1.90	微量	微量	微量	2.85	28.30	0	35	50	12	3	0	20	0	0	68.52	70.77
LYC1-3	76.25	5.46	1.22	微量	微量	0.91	1.52	14.33	0	28	58	12	2	0	5	0	0	82.93	85.27
LYC1-4	82.15	微量	微量	微量	微量	8	1.23	7.7	0	37	0	50	13	0	5	0	0	82.15	91.43
LYC1-5	61.25	微量	微量	微量	0.85	微量	1.41	36.50	0	30	54	12	5	0	5	0	0	61.25	62.65
LYC1-6	51.80	1.23	微量	微量	微量	微量	3.46	43.50	0	44	38	13	5	0	5	0	0	53.03	54.94
LYC1-7	84.97	2.57	0.96	微量	6.11	微量	1.93	3.44	0	22	34	34	10	0	35	0	0	88.5	96.26
LYC1-8	74.54	2.04	微量	微量	2.04	微量	3.49	17.89	12	13	33	34	9	0	58	0	0	76.58	81.06
LYC1-9	64.34	4.95	微量	微量	微量	微量	4.42	26.24	0	24	33	30	12	0	5	0	0	69.29	72.53
LYC1-10	63.62	微量	0.95	微量	1.58	微量	2.85	30.70	0	18	31	36	15	0	5	0	0	64.57	67.76
LYC1-11	87.72	5.12	1.28	微量	微量	0.96	0.96	3.96	0	17	33	38	12	0	35	0	0	94.12	95.96
LYC1-12	87.04	1.6	微量	微量	微量	4.8	2.56	5.30	0	0	46	46	8	0	0	0	0	88.64	94.36
LYC1-13	82.45	微量	微量	微量	0.96	9.66	3.54	3.42	0	40	42	14	4	0	10	0	0	82.45	96.02
LYC1-14	71.53	微量	微量	微量	1.89	微量	0.81	25.76	0	40	28	16	16	0	25	0	0	71.53	73.52
LYC1-15	74.92	微量	1.61	微量	微量	微量	3.75	19.44	0	16	31	44	10	0	15	0	0	76.53	79.74
LYC1-16	68.20	微量	2.69	2.69	微量	微量	0.73	26.43	0	35	60	6	0	0	0	0	0	70.89	72.84
LYC1-17	83.91	微量	3.30	3.30	微量	微量	1.80	10.09	2	50	38	10	0	30	0	0	0	87.21	89.63
LYC1-18	61.53	微量	微量	微量	3.92	4.17	3.68	26.70	0	59	35	6	0	0	0	0	0	61.53	69.74

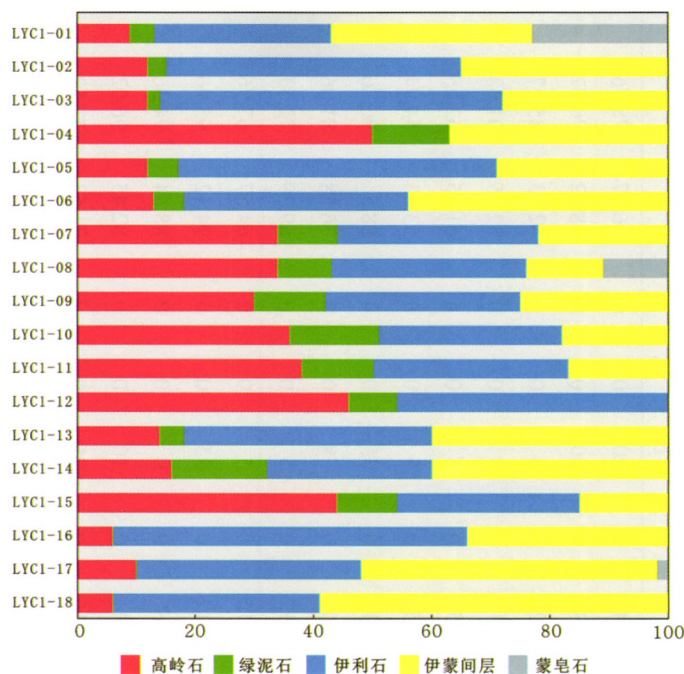


图3 涟源凹陷测水组泥页岩粘土矿物相对含量分布

Fig. 3 Relative contents of clay minerals of the Ceshui Formation shale in Lianyuan depression

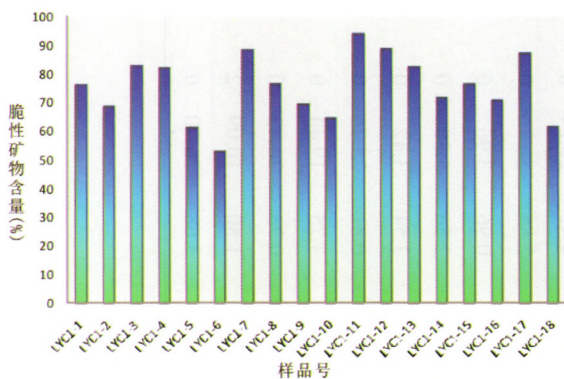


图4 涟源凹陷测水组泥页岩脆性矿物含量分布

Fig. 4 Brittle mineral content distribution of the Ceshui Formation shale in Lianyuan depression

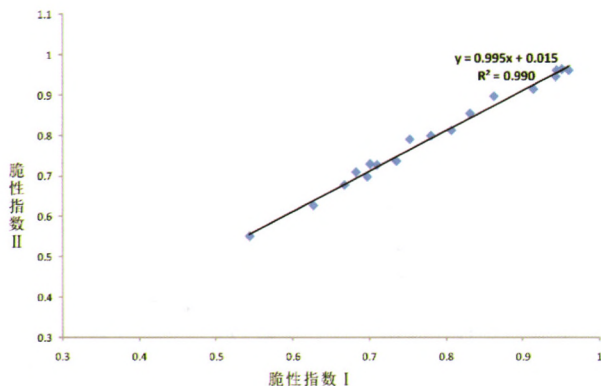


图5 页岩脆性指数 I , II 相关性

Fig. 5 Relationship between shale brittleness index I , II

明,湘中涟源凹陷测水组泥页岩样品的脆性指数较高,分布区间 0.54 ~ 0.96 之间,平均 0.8。北美 Barnett、Woodford 页岩脆性指数平均值分别为 0.45,0.71^[4],当页岩脆性指数大于 0.4 时,该页岩具有良好的可压裂性^[4]。因此,湘中涟源凹陷测水组泥页岩整体上具有良好的脆性和可压性,有利于页岩气的压裂改造。

4 结论

(1)X 射线衍射定量分析结果表明,涟源凹陷测水组泥页岩的矿物以石英和粘土矿物为主。其中石英的含量最高,质量分数在 51.8% ~ 87.72%之间,平均为 72.61%;其次为粘土矿物,质量分数在 3.42% ~ 43.50%,平均为 19.46%。还含有一定的长

石、白云石、黄铁矿和方解石,平均质量分数分别为 4.02%,4.75%,2.01%和 1.66%。其余矿物含量较少,平均质量分数 <1%。

(2) 对比北美成功取得页岩气勘探开发的区块,涟源凹陷测水组泥页岩矿物石英含量相对较高,矿物组成特征与福特沃斯 Barnett 页岩有所区别,与阿卡马盆地的 Woodforth 页岩较为相似。

(3) 涟源凹陷测水组泥页岩样品的粘土矿物主要是伊利石、伊蒙混层、高岭石和绿泥石,个别样品含有少量蒙皂石。样品的粘土矿物含量中伊利石含量最高,分布范围 28%~60%,平均为 37.44%,其次为伊蒙间层(混层),含量分布范围 13%~59%,平均含量 30.11%,高岭石的含量为 6%~50%,平均含量 23.44%,绿泥石含量较低,2%~16%,平均含量只有 7.11%。

(4) 涟源凹陷测水组泥页岩普遍发育石英、长石、白云石、方解石等脆性矿物,泥页岩样品的脆性指数较高,分布范围 0.54~0.96 之间,平均 0.8,整体上具有良好的脆性和可压性,有利于页岩气的压裂改造。

参考文献:

- [1] 肖钢,唐颖.页岩气及其勘探开发[M].北京:高等教育出版社,2012:49-53.
- [2] 王志刚.涪陵页岩气勘探开发重大突破与启示[J].石油与天然气地质,2015,36(1):1-6.
- [3] Curtis J B. Fractured shale-gas systems[J]. American Association of Petroleum Geologist Bulletin,2002,86(11):1921-1938.
- [4] Jarvie D M, Hill R J, Ruble T E. Unconventional shale-gas systems:The Mississippian Barnett shale of north-central Texas as one model [J]. American Association of Petroleum Geologist Bulletin,2007,91(4):475-499.
- [5] 张金川,金之钧,袁明生.页岩气成藏机理和分布[J].天然气工业,2004,24(7):15-18.
- [6] 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.
- [7] 付小东,秦建中,腾格尔,王小芳.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.
- [8] Bowker K A. Barnett shale gas production,Fort Worth Basin: Issues and discussion [J]. American Association of Petroleum Geologist Bulletin,2007,91(4):523-533.
- [9] 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.
- [10] 周进高,邓红婴,冯加良.湖南涟源凹陷构造演化与油气成藏研究[J].地质科学,2003,38(1),44-51.
- [11] 朱锐,郭建华,周小康,王明艳,苏娟.湖南涟源凹陷构造解析[J].河南石油,2006,20(1):5-7.
- [12] 敬乐,潘继平,徐国盛,马若龙,袁海峰,罗小平,吴昌荣.湘中坳陷海相页岩层系岩相古地理特征[J].成都理工大学学报(自然科学版),2012,39(2):215-222.
- [13] 邵龙义,张鹏飞,刘钦甫,郑茂杰.湘中下石炭统测水组沉积层序及幕式聚煤作用[J].地质论评,1992,38(1):52-59.
- [14] 李钊源.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.
- [15] 赵杏媛,何东博.黏土矿物与页岩气[J].新疆石油地质,2012,33(6):643-647.
- [16] 邹才能,董大忠,王社教,李建忠,李新景,王玉满,李登华,程克明.中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J].石油勘探与开发,2010,37(6):641-653.
- [17] Gale J F W, Reed R M, Holder J. Natural fractures in the Barnett shale and their importance for hydraulic fracture treatments [J]. American Association of Petroleum Geologist Bulletin, 2007, 91(4):603-622.
- [18] Loucks R G,Stephen C R. Mississippian Barnett shale: Lithofacies and depositional setting of a deep-water shale-gas succession in the Fort Worth Basin,Texas [J]. American Association of Petroleum Geologist Bulletin, 2007,91(4):579-601.