

doi:10.3969/j.issn.1007-3701.2016.02.007

湘中地区邵阳凹陷二叠系页岩储集物性特征研究

张国涛, 陈孝红, 张保民, 李 海

ZHANG Guo-Tao, CHEN Xiao-Hong, ZHANG Bao-Ming, LI Hai

(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, Hubei, China)

摘要:基于全岩、粘土矿物 X 射线衍射、低温氮气吸附实验等手段, 结合有机地球化学等参数对邵阳凹陷二叠系页岩储层物性特征进行了深入的研究, 并探讨了页岩储集物性的控制因素。分析结果表明: 1) 页岩矿物成分中普遍具较高的脆性矿物含量, 这能提高页岩孔隙度, 并有利于储层开发过程中的压裂, 然而相对低的粘土矿物含量可能会降低页岩储层吸附性; 2) 页岩孔隙大小以微孔、中孔为主, 两者贡献了绝大部分的比表面积、总孔体积, 仅存在的少量大孔对于比表面积与总孔体积的影响较小。孔隙形态普遍为具平行板壁的狭缝形, 且开放性良好。3) 有机碳含量与粘土矿物含量是页岩比表面积、总孔体积的主要控制因素, 平均孔径的分布特征与比表面积、总孔体积之间呈现一定反相关性, 即越小平均孔径的页岩, 能够提供的比表面积与总孔体积越大。热演化程度对于页岩孔隙发育的影响具正反两面性, 在相关性分析并没有发现它们之间具明显的规律性。

关键词:邵阳凹陷; 二叠系; 岩矿特征; 微观孔隙特征; 比表面积

中图分类号: P534.46; P618.13

文献标识码: A

章编号: 1007-3701(2016)02-149-10

Zhang G T, Chen X H, Zhang B M and Li H. Physical Property Characteristic of Permian Shale Reservoir in the Shaoyang Depression, Central Hunan Province. *Geology and Mineral Resources of China*, 2016, 32(2):149–158.

Abstract: In an attempt to elucidate the physical properties of the Permian shale reservoirs in the Shaoyang sag, we have investigated mineral composition and content of shales by using X-ray diffraction method, and measuring surface area and pore volume of shales by the method of BET (low temperature nitrogen adsorption method), then discussed the controlling factors of the physical properties of reservoir through combing with the organic geochemistry of shale reservoir. The analysis result shows that: 1) the Permian shales generally have a high content of brittle mineral composition, which may improve the shale porosity, and facilitate fracturing for shale gas reservoir in the process of development, but it can be reducing adsorption for shale reservoirs due to low level of clay minerals; 2) shale pore size is characterized mainly by micropore and mesopore, which both contribute vast majority of specific surface area, total pore volume, only a few large pore were less affected for the specific surface area and total pore volume. The morphology of pore is generally narrow with parallel plate, good openness. (3) the content of organic carbon and clay minerals dominate mainly shale specific surface area and total pore volume of shale, the correlation between average pore size and surface area, total pore volume are negative, it means that the shales with smaller average pore size can provide larger specific surface area and total pore volume. In addition, due to

收稿日期: 2016-03-22; 修回日期: 2016-04-22.

基金项目: 中国地质调查局项目“中扬子地区页岩气新层系调查评价(12120115005601)”资助。

第一作者: 张国涛(1985—), 男, 助理研究员, 现主要从事岩石地层学方面的研究, E-mail: wolfcastle@sina.com.

two sides of the influence of thermal evolution degree on the development of shale pore, there is no obvious regularity between thermal maturity and surface area, total pore volume.

Key words: Shaoyang Sag; Permian; rock and mineral characteristics; micropore; specific surface area

1 引言

页岩气的勘探开发越来越成为当前油气勘探领域的热点,页岩储层物性作为页岩含气性与开采条件的重要决定因素,越来越受到国内外众多学者的关注^[1-4]。页岩储层相对于常规油气储层具有极低孔低渗(孔隙大小一般达到纳米级)、富含有机质与粘土矿物、比表面积巨大、复杂的成岩作用改造等特性^[5],其储集条件优劣是页岩气富集主控因素之一^[6]。页岩的孔隙结构与特性不仅影响了气体的储集和吸附能力,而且影响了页岩气的运移与开采^[7]。

湘中地区二叠系页岩储层兼有大隆组、孤峰组海相地层与海陆过渡相的龙潭组地层,分布广泛且厚度较大,具有良好的基础地质条件,不少学者对湘中地区二叠系页岩地层进行了诸如岩相古地理、岩石矿物学特征、有机地球化学等方面的研究^[8-10],亦有少量学者对湘中地区二叠系地层页岩气资源作了综合性潜力分析与评价^[11-12],然而专门针对邵阳地区二叠系页岩孔隙特征的研究较少,本文旨在通过低温氮气吸附实验,分析页岩孔隙的孔体积及孔径分布等特征,并结合有机地球化学、岩石矿物学来探讨页岩储层物性特征及其影响因素。

2 地质背景

湘中坳陷大地构造位置位于扬子地台与华南褶皱带相邻地带的华南褶皱带一侧,即雪峰隆起由北东向转为北东东向的弧形构造带的凹侧^[13]。邵阳凹陷位于湘中坳陷的中部,北接龙山凸起,南临关帝庙凸起,东西缘分别受限于衡山隆起带与江南—雪峰山隆起带,整体呈北东向展布。二叠纪地层发育完整,含具工业价值的煤矿及锰矿,岩性组合下部为浅海碳酸盐及硅泥质沉积;中上部为陆缘含煤碎屑沉积,顶部为硅质、硅泥质沉积^[14]。

龙潭组沉积早期海水全面退出湘中地区,开始广泛发育滨海沼泽相沉积,发育少量煤层,分南北型;同期异相沉积为吴家坪组灰岩,岩性以粉砂岩、

页岩为主。邵阳凹陷内可分上下两段,下段为不含煤段,以杂色、黑色页岩、炭质页岩、砂质页岩为主夹灰白—灰黄色长石石英砂岩,厚约 120 m,上段为含煤层段,主要以黑色炭质页岩中细粒石英砂岩夹少量粉砂岩、钙质页岩及 1~3 层煤层,厚约 50 m,含丰富的植物化石,属晚二叠世滨海—滨海沼泽沉积,与下伏孤峰组整合接触^①。大隆组与下伏龙潭组呈整合接触,下部岩性以深灰色薄—中层硅质岩、含钙质硅质岩为主,中下部为一套中层状灰岩与中薄层硅质岩互层层段,并可见灰岩结核,上部渐变为灰黑色、深灰色薄层状硅质岩、泥质硅质岩,在邓家铺、邵东芦山村等地厚度可达 100 m 以上。孤峰组下部与栖霞组灰岩整合接触,为一套厚约 20~30 m 灰黑色、黑色薄层泥岩、硅质泥岩,上部为厚约 120 m 的硅质岩。

3 材料与方法

针对二叠系页岩储集物性特征,分别选取区内西部竹市镇高峰剖面、西南部新宁岩门前剖面、中部邓家铺剖面及东部的荷吕观剖面与芦山村剖面等 5 条剖面为代表(图 1),采集大隆组、龙潭组、孤峰组三个组野外露头页岩样品共 20 件,采样过程中尽量选择新鲜的岩石,并避开含有后期充填裂缝处石英脉或有溶蚀现象的岩石面,去掉岩石样品表面附着的杂质。

岩石矿物组分与含量分析全部由湖南省勘查设计研究院试验检测中心测试完成,采用 PANalytical 生产的型号为 X'pert powder X 射线衍射仪,靶材为 Cu 靶。测试方法和流程参照国家标准 SY/T5163-2010: 首先将样品在低于 60℃ 的温度下烘干,然后取 1~2 g 样品粉碎并研磨至粒径小于 40 μm,非粘土矿物采用的 K 值定量法进行测定,而粘土矿物总量则是采用的水悬浮液分离的方法测定的,测试时采用的工作电流为 40 mA,电压为 40 KV,采样步宽为 0.02°(2θ),扫描速度 2°(2θ)/min,测试的精度高,角度重现性达 ±0.0001°,最小步长为 0.0001°。

比表面积与孔径测试分析全部由武汉地质调查中心油气室来完成,试验采用美国康塔公司 Autosorb-iQ 全自动比表面与孔隙度分析仪来完成。实验前将样品碎至 200 目,经过 300℃ 真空脱气 3 h,除去水汽及其它杂质气体后,在 77.3 K 液氮环境下进行等温吸附—脱附试验,在相对压力 0.05 ~ 0.25 之间,采用多点 BET 模型进行比表面积的测算,通过 DFT、BJH 模型分析孔径分布与孔容特征。

4 结果与讨论

4.1 页岩矿物组成

X 衍射测试结果显示:二叠系页岩脆性矿物含量总和平均高达 77.87%(表 1),占据了页岩组分的主体,粘土矿物含量居其次(图 2),平均含量约为 22.13%(8.68% ~ 40.56%),脆性矿物与粘土矿物之比为 1.47 ~ 10.52,平均为 3.52。脆性矿物组分中石英、长石与黄铁矿平均含量分别为 66.2%(33.18% ~ 91.32%)、0.274%(0% ~ 3.17%)、0.77%(0% ~ 4.18%);方解石 4.22%(0% ~ 27.25%)、白云石 1.29%(0% ~ 9.36%)。石英、长石与黄铁矿对脆性矿物含量贡献最大,合计可达 67.24%,碳酸盐岩含量相对较低仅 5.51%。

粘土矿物主要由伊利石组成(表 2),相对平均

含量达 49.9%(0% ~ 100%),其次是伊蒙间层,平均为 20.8%(0% ~ 80%)、绿泥石相对平均含量为 15.95%(0% ~ 73%)、高岭石相对平均含量为 12%(0% ~ 38%)。而蒙脱石除了 15pm019-4 号样品外其它样品全为 0,蒙脱石向伊利石转化使无序的混层粘土向有序的混层粘土过渡,当粘土矿物以伊利石为主,则可形成连通性较好的层状粒间孔^[15-16],虽然成岩过程中的压实作用以及蒙脱石向伊利石的转化会导致矿物的比表面和微孔隙减小,不利于页岩气的赋存,但蒙脱石脱水产生的微裂缝以及异常高压,会提高页岩气的储存能力^[17],综合来看邵阳凹陷二叠系页岩粘土矿物含量分布对孔隙条件及页岩气储存能力仍具有积极的作用。

脆性矿物含量高意味着页岩储层具更好的压裂性,更易获得页岩气增产^[18],另外脆性矿物含量高的岩层在成岩过程中易生成天然微裂缝从而改善储集性能,因此脆性矿物含量高的层段含气性较好^[9],邵阳地区二叠系页岩高脆性矿物含量对储集条件比较有利,然而脆性矿物的比表面积、孔容及对页岩气的吸附性等条件都不及粘土矿物^[19],这就会造成一方面过高的脆性矿物含量有利于页岩储层的压裂,提高孔隙度,另一方面较低粘土矿物含量可能造成页岩储层吸附性不够理想。

另外,平面上邵阳凹陷内二叠系粘土矿物含量

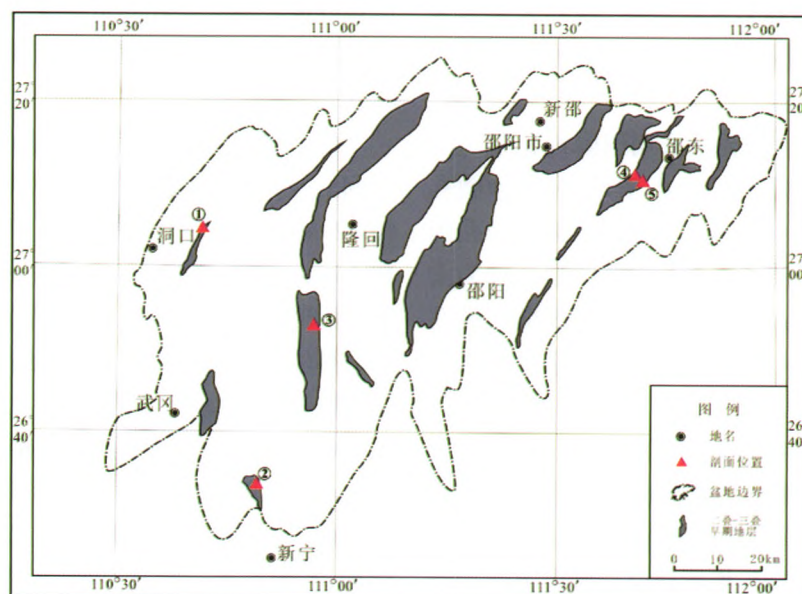


图1 邵阳凹陷二叠系地层露头分布与剖面位置

Fig. 1 Simplified map of outcrop distribution of the Permian strata and the location of section in the Shaoyang depression

1.洞口竹市剖面;2.新宁岩门前剖面;3.隆回邓家铺剖面;4.邵东荷吕观剖面;5.邵东芦山村剖面。

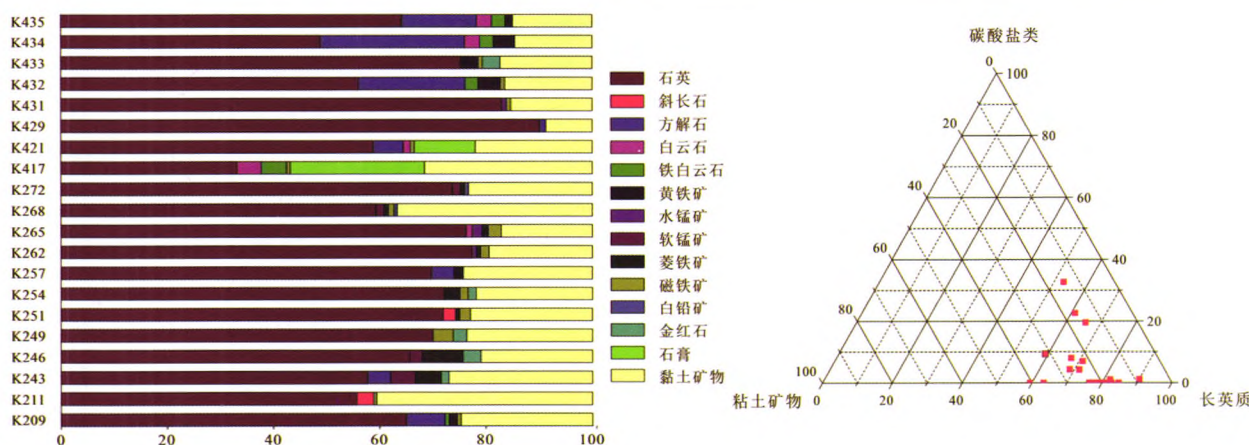


图2 页岩矿物组分条形图与三角图

Fig. 2 Mineral composition bar chart and triangle chart of shale in Permian strata

一般具东部相对较高的特点,而西部脆性矿物含量相对较高,西部竹市镇、邓家铺的碳酸盐岩矿物含量明显大于东部的邵东芦山村、荷吕观样品所测数值,储层横向具有很大变化,非均质性强。不同层系之间比较也发现(表3),石英、长石与黄铁矿的平均含量龙潭组>孤峰组>大隆组,粘土矿物平均含量龙潭组>大隆组>孤峰组,大隆组与孤峰组碳酸盐岩矿物含量相当分别为22.6%、17.4%,远大于龙潭组的2.1%。龙潭组为海陆过渡相沉积,受明显的陆源碎屑物质的影响,而大隆组、孤峰组同属还原性台盆沉积,属碳酸盐岩沉积环境,这些差异体现了岩石矿物组分、含量与沉积环境特征的一致性。

4.2 低温氮气吸附实验

本文在孔隙大小分类上采用国际纯化学与应用化学学会的分类标准^[20],小于2 nm称为微孔(micropore),介于2~50 nm之间的孔隙为中孔隙或介孔(mesopore),而大于50 nm的纳米孔则为大孔隙或宏孔(macropore)。通过对邵阳凹陷二叠系10个页岩样品进行比表面积与孔径分布测试发现:

(1)等温吸附曲线均属于Ⅱ型(图3),吸附曲线前段吸附量随相对压力的增加小幅度上升,当相对压力趋近1时,吸附线出现急剧上升现象,并未表现出饱和吸附的情况,推测样品在吸附氮气过程中出现了毛细凝聚的现象,页岩中可能含有一定量的大孔。

(2)虽然滞后环开口幅度不一,但二叠系10个

页岩样品都出现了滞后环,根据国际纯化学与应用化学联合会(IUPAC)推荐的4种分类法,所有页岩样品滞后环类型均属于H3型。由于封闭性孔,包括一端封闭的圆筒形孔、平行板孔和圆锥形孔,不能产生吸附回线,尽管墨水瓶孔作为一种特殊形态的孔,能产生滞后回线,但解吸曲线存在一个急剧下降的拐点^[21-22],从二叠系页岩测试结果来看,当相对压力大于0.45时,脱附线脱离趋势产生向上的拐点,随后回归趋势与吸附线上下并行(除孤峰组K209号样品以外),但不存在很急剧拐点,因此可以排除墨水瓶孔存在的可能性,从而确定区域内页岩样品孔隙普遍为开放性的且具平行板壁的狭缝状孔。

(3)样品页岩比表面积在0.391~27.909 m²/g之间,平均为18.032 m²/g;总孔体积介于0.001~0.042 cc/g,平均为0.0253 cc/g;平均孔径介于6.3~19.15 nm之间,平均为9.66 nm(表4)。从层系上来看,龙潭组比表面积、总孔体积均大于孤峰组、大隆组,平均孔径则小于其它两个组,尤其是孤峰组页岩,测试结果远小于其它两组。

(4)以K209号样品为例,通过DFT模型对0~30 nm孔径的孔隙分析发现(图4):孔径主要分布在0.6~0.8 nm,1.4~2.3 nm及2.5~6.4 nm三个区间内,孔隙大小以微孔、中孔为主体。通过BJH模型分析可以发现,除了微孔与中孔外,还存在少量的大孔,但是这些大孔对于比表面积与总孔体积影响较小,中孔与微孔贡献了绝大部分的比表面积与

表1 X衍射全岩矿物组分与含量
Table 1 The whole mineral composition and content chart of the X-ray diffraction analysis

地层	样品编号	石英	斜长石	方解石	白云石	铁白云石	黄铁矿	水锰矿	软锰矿	菱铁矿	磁铁矿	白铅矿	金红石	石膏	粘土矿物
龙潭组	K209	64.98	0.00	7.28	0.00	0.75	1.51	0.00	0.00	0.00	0.75	0.00	0.00	0.00	24.73
	K211	55.67	3.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.59	0.00	0.00	0.00	40.56
	K243	57.68	0.00	4.38	0.00	0.00	0.00	0.00	4.62	4.87	0.00	0.00	1.46	0.00	26.99
	K246	65.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.37	7.67	0.00	0.00	3.43	0.00	20.91
	K249	70.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.82	0.00	2.55	0.00	23.61
	K251	71.94	2.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.77	2.05	0.00	0.00	0.00	22.92
	K254	72.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.87	1.56	0.00	1.56	0.00	21.82
	K257	69.69	0.00	4.29	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.75	0.00	0.00	0.00	0.00	24.25
	K262	77.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.81	0.00	0.81	1.61	0.00	0.00	0.00	19.41
	K265	76.29	0.00	0.00	1.11	0.00	0.00	1.91	0.00	1.11	2.49	0.00	0.00	0.00	17.11
	K268	59.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.48	0.84	1.06	0.63	0.00	0.00	36.65
	K272	73.68	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.54	0.77	0.00	0.77	0.00	0.00	23.25
	K417	33.18	0.00	0.00	4.57	4.79	0.00	0.00	0.00	0.00	0.68	0.00	0.00	25.28	31.50
	K421	58.79	0.00	5.72	1.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.78	0.00	0.00	11.45	21.96
大隆组	K429	90.10	0.00	1.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.68
	K431	83.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.85	0.00	0.00	0.85	0.00	0.00	0.00	15.25
大隆组	K432	56.07	0.00	20.05	0.00	2.51	4.18	0.00	0.00	0.00	0.84	0.00	0.00	0.00	16.35
孤峰组	K433	75.30	0.00	0.00	0.00	0.00	3.31	0.00	0.00	0.00	0.83	0.00	3.31	0.00	17.25
	K434	48.80	0.00	27.25	2.88	2.57	4.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	14.49
	K435	64.19	0.00	14.13	2.84	2.55	1.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	14.87

表2 X衍射粘土矿物组分与含量

Table 2 The clay mineral composition and content chart of the X-ray diffraction analysis

地层	样品编号	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
龙潭组	K209	0	19	60	10	6	4	4
	K211	0	0	90	6	4	0	0
	K243	0	30	22	30	18	0	20
	K246	0	25	20	38	17	0	10
	K249	0	0	82	8	10	0	0
	K251	0	0	80	6	13	0	0
	K254	0	32	56	4	8	0	5
	K257	0	26	60	6	8	0	5
	K262	0	0	76	8	16	0	0
	K265	0	18	68	6	8	0	8
	K268	0	34	38	16	12	0	40
	K272	0	42	36	6	16	0	8
	K417	0	0	100	0	0	0	0
	K421	0	26	74	0	0	0	5
	K429	0	0	76	6	17	0	0
	K431	18	0	60	16	5	0	95
大隆组	K432	0	84	0	6	10	0	48
孤峰组	K433	0	0	0	26	73	0	0
	K434	0	0	0	34	66	0	0
	K435	0	80	0	8	12	0	68

表3 不同层系全岩矿物平均含量

Table 3 The average content of the whole rock mineral in the different strata

地层	石英	斜长石	方解石	白云石	铁白云石	黄铁矿	水锰矿	软锰矿	菱铁矿	磁铁矿	白铅矿	金红石	石膏	粘土矿物
龙潭组	67.5	0.3	1.4	0.4	0.3	0.2	0.2	0.6	1.3	1.0	0.1	0.6	2.3	23.7
大隆组	56.1	0.0	20.1	0.0	2.5	4.2	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0	16.4
孤峰组	62.8	0.0	13.8	1.9	1.7	2.9	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	1.1	0.0	15.5

总孔体积。

4.3 比表面积与孔体积控制因素分析

有机碳含量、热演化程度、干酪根类型、粘土矿物与含量等因素,均不同程度地控制着泥页岩微观孔隙的发育^[23],而泥页岩孔隙的微观结构主要通过低温氮气吸附实验取得的比表面积、总孔体积、平均孔径等参数来表征,为探讨孔隙发育的影响因素,下面就它们之间的关系进行分析。

4.3.1 有机碳含量与比表面积、总孔体积的关系

已有的研究结果表明有机质和粘土矿物等具

有较高的比表面积,为页岩吸附气提供了重要的场所^[24],二叠系页岩样品在粘土矿物、类型等条件相似的情况下,比表面积、总孔体积与有机碳含量具较好的正相关性(图 5)。另一方面比表面积、总孔体积又与平均孔径具有一定程度的反相关性,平均孔径越小,孔隙所提供的比表面积、总孔体积就越大,而平均孔径的大小又与有机碳含量呈现一定反相关性,这说明有机碳含量与比表面积、总孔体积、平均孔径具不同程度的内在关联,有机碳含量是比表面积、总孔体积的主要控制因素,同时也影响着

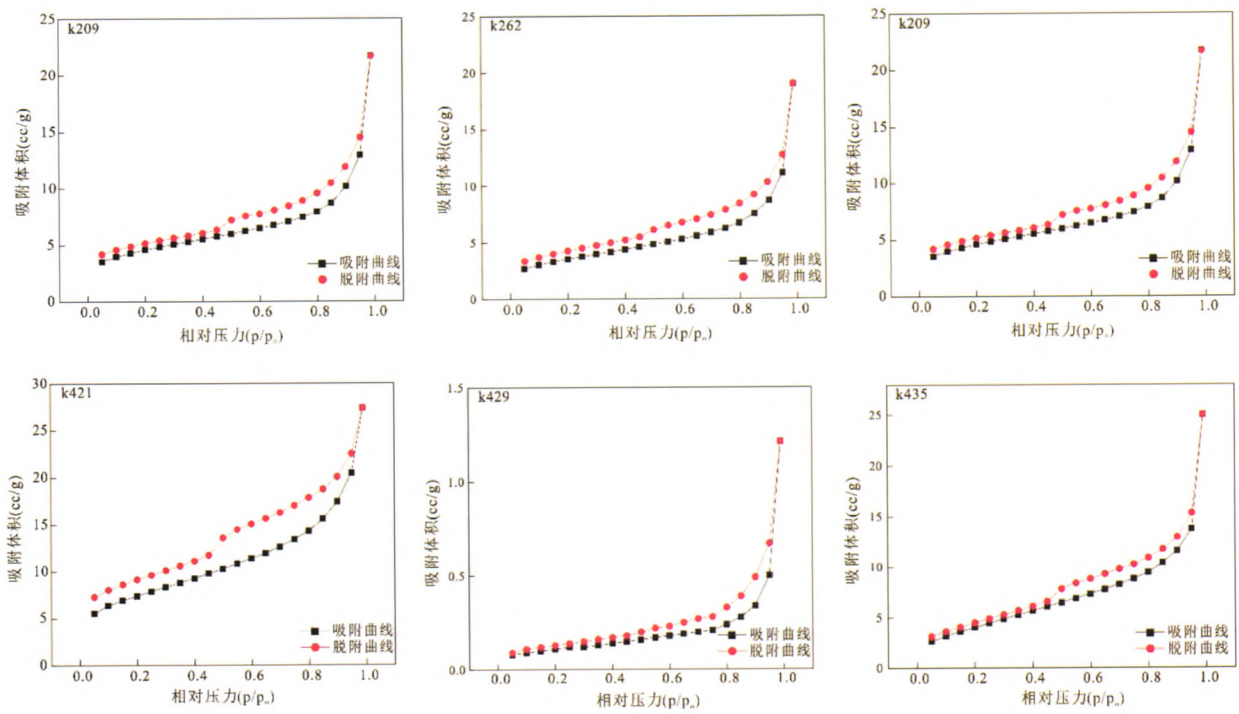


图3 页岩样品吸附—脱附等温线

Fig. 3 Adsorption-desorption isotherms of shale samples

k429为孤峰组,k435为大隆组,其余均为龙潭组.

平均孔径的分布。

4.3.2 热演化程度与比表面积、总孔体积的关系

二叠系页岩有机质成熟度主要集中于 2.05% ~ 2.8%之间,热演化程度比较接近,相关性分析发现有机值成熟度与比表面积和总孔体积并无明显相关性。这可能是热演化对于页岩孔隙发育的影响具两面性造成的,一方面有机质在热解生烃过程中,随着热演化程度的增大,有机质孔隙结构会发生变化,孔隙度会随之增加,如果页岩有机质质量百分含量为 7%,则体积百分含量为 14%,若 35%的有机质发生转化,则页岩孔隙能够增加 4.9%^[18],并且小孔和微孔的数量将增多,从而增大了有机质孔隙的比表面积和孔体积^[19],另一方面热演化会改变粘土矿物类型及含量,而不同粘土矿物晶层及孔隙结构的不同造成孔隙比表面积的较大差异,如蒙脱石的比表面积就远大于伊利石、绿泥石等矿物,随着热演化程度的增大,粘土矿物中蒙脱石开始向伊-蒙间层甚至伊利石转化,其含量逐渐降低,在此过程中粘土矿物间微孔隙比表面积和孔体积大大降低^[25-26]。热演化的这种两面性,作用呈现反向性,相互矛盾,从而造成热演化程度与比表面积、总孔体

积之间的无规律性。

4.3.3 粘土矿物含量与比表面积、总孔体积的关系

通过页岩岩矿数据与比表面、孔径分布数据之间的相关性分析中发现,粘土矿物含量与比表面积、总孔体积都具有较好的相关性(图 6),这可能是由于粘土矿物特殊的比表面使得气体分子既可以吸附于粘土矿物外表面,也可以吸附于晶石层间内表面,这种特性使粘土矿物较其他无机矿物具有更大的吸附空间^[27],所以粘土矿物含量越高,比表面积与总孔体积则越高。粘土矿物含量与平均孔径呈现一定反相关性,由于粘土矿物的孔径远小于无机矿物的孔径,当孔径小的粘土矿物占优时,则脆性矿物会相应减少,其代表性的无机大孔相应的也会减少。另外,粘土矿物含量与有机碳含量无明显相关性,这表明粘土矿物含量高也并不意味着有机碳含量高。

5 结论

(1)二叠系页岩主要的矿物组分为脆性矿物和粘土,平均含量分别为 77.87%、22.13%,脆性矿物

表4 二叠系页岩样品比表面与孔径、有机地球化学分析结果

Table 4 The analysis results of surface area and pore size, organic geochemistry of the shale samples

层位	样品 编号	TOC (%)	Ro (%)	比表面积 (m ² /g)	总孔体积 (cc/g)	平均孔径 (nm)	粘土矿物 (%)
龙潭组	K209	8.10	2.10	27.09	0.042	6.30	24.73
	K211	4.08	2.05	27.909	0.034	8.23	40.56
	K249	2.30	2.63	17.493	0.025	8.90	23.61
	K257	2.56	2.60	15.819	0.021	8.50	24.25
	K262	1.19	2.71	12.29	0.018	9.59	19.41
	K268	1.41	2.72	20.592	0.027	7.32	36.65
	K417	4.01	2.52	19.34	0.031	10.62	31.50
	K421	7.69	2.80	25.889	0.032	6.55	21.96
孤峰组	K429	0.24	2.33	0.391	0.001	19.15	8.68
大隆组	K435	2.74	2.24	13.509	0.022	11.47	14.87

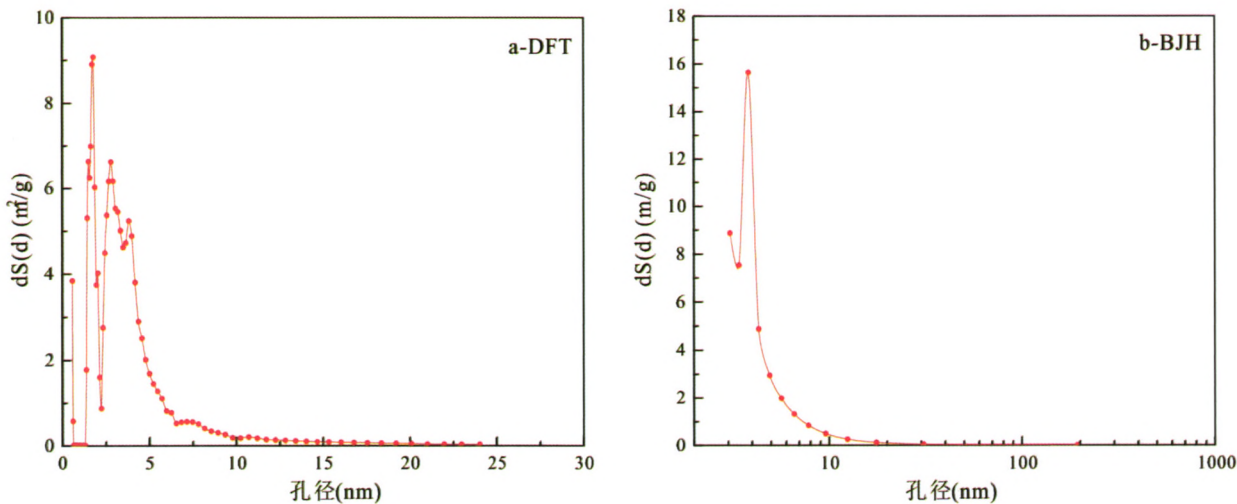


图4 页岩样品DFT模型(a)和BJH模型(b)孔径分布

Fig. 4 Pore size distribution of shale samples in DFT model (a) and BJH model(b)

注：比表面积随孔径的变化率，a为dS/dD，b为ds/dlog(D)，S为比表面积，D为孔径。

中碳酸盐矿物含量相对较低仅 8.98%，石英、长石与黄铁矿占据了页岩组分的主体，达 67.24%。粘土矿物主要由伊利石组成，相对平均含量达 49.9%，其次是伊蒙间层、绿泥石、高岭石，几乎不含蒙脱石。

(2) 二叠系页岩比表面积在 0.391 ~ 27.909 m²/g 之间，平均为 18.032 m²/g；总孔体积介于 0.001 ~ 0.042 cc/g 之间，平均为 0.0253 cc/g；平均孔径介于 6.3 ~ 19.15 nm 之间，平均为 9.66nm。孔隙大小

以微孔、中孔为主，两者贡献了绝大部分的比表面积、总孔体积，仅存在的少量大孔对于比表面积与总孔体积的影响甚微。滞后环类型属 H3 或者 H4 型，孔隙形态为开放性的具平行板壁的狭缝状孔。

(3) 二叠系页岩有机碳含量、粘土矿物含量是比表面积、总孔体积的主要控制因素。平均孔径越小的页岩提供的比表面积、总孔体积越大。热演化程度由于其对页岩孔隙影响的具两面性，使得其与比表面积、总孔体积并无明显规律性。

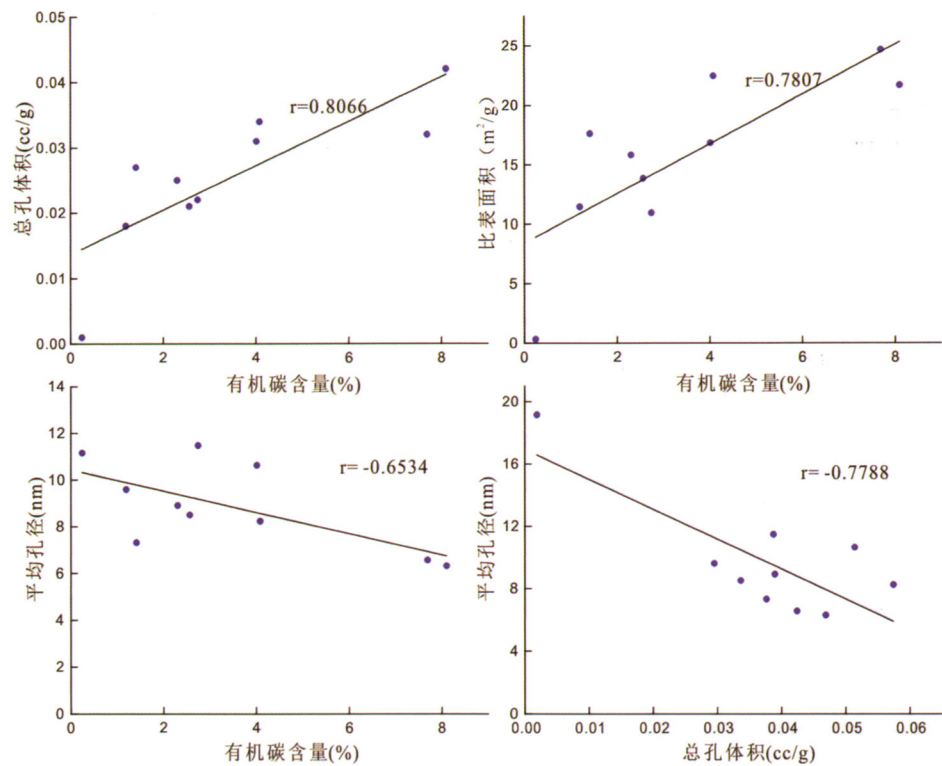


图5 有机碳含量与比表面积、总孔体积、平均孔径关系图

Fig. 5 Correlations between organic carbon content and surface area , total pore volume , average pore size

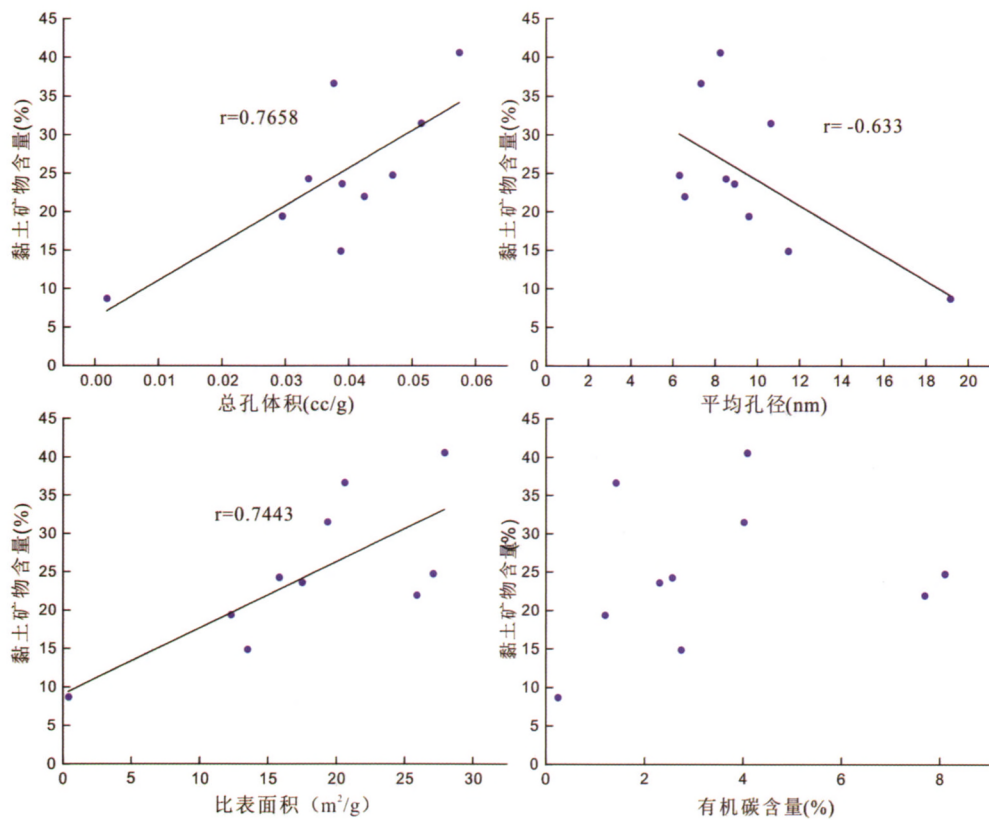


图6 粘土矿物含量与比表面积、总孔体积、平均孔径及有机碳含量关系图

Fig. 6 Correlations between clay mineral content and surface area , total pore volume , average pore size

注释:

- ① 湖南地质矿产勘查开发局四一八队. 1:5万邓家铺幅区域地质调查报告及说明书[R]. 1996.

参考文献:

- [1] Mastalerz M, Schimmelmann A, Drobnik A, Chen Y Y. Porosity of Devonian and Mississippian New Albany Shale Across a Maturation Gradient: Insights From Organic Petrology, Gas Adsorption, and Mercury Intrusion [J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 2013, 97(10): 1621–1643.
- [2] Loucks R G, Reed R M, Ruppel S C, Hammes U. Spectrum of Pore Types and Networks in Mudrocks and a Descriptive Classification for Matrix-related Mudrock Pores[J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 2012, 96 (6): 1071–1098.
- [3] 蒲泊伶, 董大忠, 牛嘉玉, 王玉满, 黄金亮. 页岩气储层研究新进展[J]. 地质科技情报, 2014, 33(2): 98–104.
- [4] 邹才能, 朱如凯, 白斌, 杨智, 吴松涛, 苏玲, 董大忠, 李新景. 中国油气储层中纳米孔首次发现及其科学价值[J]. 岩石学报, 2011, 27(6): 1857–1864.
- [5] 于炳松. 页岩气储层孔隙分类与表征[J]. 地学前缘, 2013, 20(4): 211–220.
- [6] 王玉满, 董大忠, 李建忠, 王社教, 李新景, 王黎, 程克明, 黄金亮. 川南下志留统龙马溪组页岩气储层特征[J]. 石油学报, 2012, 33(4): 551–561.
- [7] 杨峰, 宁正福, 胡昌蓬, 王波, 彭凯, 刘慧卿. 页岩储层微观孔隙结构特征[J]. 石油学报, 2013, 34(2): 301–311.
- [8] 顾志翔, 彭勇民, 何幼斌, 胡宗全, 翟羽佳. 湘中坳陷二叠系海陆过渡相页岩气地质条件 [J]. 中国地质, 2015, 42(1): 288–299.
- [9] 罗小平, 刘军, 徐国盛, 马若龙, 鲜志尧, 徐猛. 湘中坳陷泥盆—石炭系海相泥页岩地球化学特征及等温吸附性能[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2012, 39(2): 206–214.
- [10] 徐昉昊, 钱劲, 袁海峰, 徐国盛, 梁家驹. 湘中—湘东南坳陷泥页岩层系沉积模式及储层特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2015, 42(1): 80–89.
- [11] 李国亮, 王先辉, 柏道远, 罗鹏, 姜文. 湘中及湘东南地区上二叠统龙潭组页岩气勘探前景 [J]. 地质科技情报, 2015, 34(3): 133–138.
- [12] 殷虹, 潘泽雄. 湘中坳陷非常规及常规资源勘探潜力分析[J]. 天然气技术与经济, 2012, 6(1): 37–40, 43, 78.
- [13] 何红生. 涟邵煤田北段测水煤系岩相古地理与聚煤作用[J]. 中国煤炭地质, 2009, 21(3): 11–15.
- [14] 何欣, 孙海清. 邵阳盆地二叠纪层序地层初步研究[J]. 湖南地质, 2002, 21(1): 1–6.
- [15] 吴伟, 刘惟庆, 唐玄, 周雪晴, 郑伟, 宋党育. 川西坳陷富有机质页岩孔隙特征[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38(4): 1–8.
- [16] 马力. 中国南方大地构造和海相油气地质[M]. 地质出版社, 2004.
- [17] 李颖莉, 蔡进功. 泥质烃源岩中蒙脱石伊利石化对页岩气赋存的影响[J]. 石油实验地质, 2014, 36(3): 352–358.
- [18] Jarvie D M, Hill R J, Ruble T E, Pollastro R M. Unconventional Shale-gas Systems: the Mississippian Barnett Shale of North-central Texas as One Model for Thermogenic Shale-gas Assessment [J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 2007, 91(4): 475–499.
- [19] Ross D J, Bustin R M. Characterizing the Shale Gas Resource Potential of Devonian mississippian Strata in the Western Canada Sedimentary Basin: Application of an Integrated Formation Evaluation[J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 2008, 92(1): 87–125.
- [20] Rouquerol J, Avnir D, Fairbridge C W, Everett D H, Haynes J H, Pernicone N, Ramsay J D, Sing K S, Unger K K. Recommendations for the Characterization of Porous Solids (technical Report)[J]. Pure and Applied Chemistry, 1994, 66(8): 1739–1758.
- [21] 陈尚斌, 左兆喜, 朱炎铭, 付常青, 张寒. 页岩气储层有机质成熟度测试方法适用性研究 [J]. 天然气地球科学, 2015, 26(3): 564–574.
- [22] 杨峰, 宁正福, 张世栋, 胡昌蓬, 杜立红, 刘慧卿. 基于氮气吸附实验的页岩孔隙结构表征[J]. 天然气工业, 2013, 33(4): 135–140.
- [23] 梁兴, 张廷山, 杨洋, 张朝, 龚齐森, 叶熙, 张介辉. 滇黔北地区筇竹寺组高演化页岩气储层微观孔隙特征及其控制因素[J]. 天然气工业, 2014, 34(2): 18–26.
- [24] 曹涛涛, 宋之光, 王思波, 夏嘉. 下扬子地台二叠系页岩储集物性特征及控制因素[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(2): 341–351.
- [25] 陆琦, 雷新荣, 刘惠芳. 不规则伊/蒙混层粘土矿物成因类型及晶体化学分类[J]. 矿物学报, 1991, 11(2): 97–104.
- [26] 董丙响, 程远方, 刘钰川, 易姓斌, 杨柳, 吴玲妍, 王蓓. 页岩气储层岩石物理性质[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2013, 28(1): 5, 25–28, 36.
- [27] 王茂桢, 柳少波, 任拥军, 田华. 页岩气储层粘土矿物孔隙特征及其甲烷吸附作用 [J]. 地质论评, 2015, 61(1): 209–218.