

黔南坳陷二叠纪玄武质火山活动 对含煤泥页岩储层的影响

李欣诚¹, 侯宇光¹, 陈振宏², 何生¹, 梁雅琪³, 刘宇坤¹, 宋颖睿⁴, 余锐¹

(1.中国地质大学(武汉)构造与油气资源教育部重点实验室,武汉 430074;

2.中国石油天然气集团有限公司勘探开发研究院,北京 100083;

3.湖北省地质实验测试中心,武汉 430034;

4.中国科学院地质与地球物理研究所,中国科学院油气资源研究重点实验室,北京 100029)

摘要:为了研究火山活动对泥页岩储层的影响,以黔南坳陷二叠纪峨眉山玄武岩对龙潭组泥页岩储层的影响为例,通过总有机碳含量、XRD、镜质体反射率以及低温氮气及二氧化碳吸附等方法,研究了火山活动对含煤泥页岩生烃、矿物成分以及储层孔隙结构等方面的影响。研究表明:火山活动对含煤泥页岩的生烃、矿物组成和孔隙结构存在明显的影响;火山活动显著促进了泥页岩的有机质成熟演化,使其迅速进入到了过成熟阶段(R_o 从2.0%增加到2.88%),加快了烃源岩的生排烃效率;随着与岩浆岩距离的减小,石英和碳酸盐矿物含量增加,黏土矿物含量减小,伊利石和绿泥石含量呈现规律变化,指示了泥页岩成岩演化也受到了一定的影响;火山活动带来的热源对泥页岩储层孔隙的形成演化产生了重要的影响,随着距离岩浆岩越近,含煤泥页岩储层中的微孔占比逐渐增高,介孔和宏孔含量呈下降趋势,推测火山活动的热作用促进了有机质孔隙的生成,同时也影响了无机孔隙的发育。

关键词:成熟度;矿物组成;孔隙结构;泥页岩储层;火山活动;二叠纪;黔南坳陷

中图分类号:TE122.221

文献标识码:A

Influence of Permian basaltic volcanic activity on coal-bearing shale reservoirs, Southern Guizhou Depression

LI Xincheng¹, HOU Yuguang¹, CHEN Zhenhong², HE Sheng¹,

LIANG Yaqi³, LIU Yukun¹, SONG Yingrui⁴, YU Rui¹

(1. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of Ministry of Education, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China; 2. PetroChina Exploration and Development Research Institute, Beijing 100083, China;

3. Hubei Geological Research Laboratory, Wuhan, Hubei 430034, China; 4. Key Laboratory of Petroleum Resources Research, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: To investigate the influences of volcanic activities on shale reservoirs, a case study was carried out on the Permian Mount Emei basalt and coal-bearing shale of Longtan Formation in the Southern Guizhou Depression. Based on the analytical results of total organic carbon content, XRD, vitrinite reflectance and cryogenic nitrogen and carbon dioxide adsorptions, the effects of volcanic activities on the hydrocarbon generation, mineral composition and reservoir microstructure of coal-bearing shale were discussed. The results showed that volcanic activities had obvious effects on the hydrocarbon generation, mineral composition and pore structure of coal-bearing shale. They significantly promoted the evolution and maturation of organic matters in shale, which quickly entered the over-mature stage (R_o increased from 2.0% to 2.88%), and accelerated the hydrocarbon generation and expulsion efficiency. With the decrease of the distance to the basalt, the contents of clastic minerals and carbonate minerals increased, the content of clay minerals decreased, and the contents of illite and chlorite changed regularly, which indicated that the evolution of shale diagenesis had also been affected to a certain extent. The heat brought by volcanic activities had an important influence on the pores of reservoirs. As it got closer to

收稿日期:2020-04-12;修订日期:2021-05-14。

作者简介:李欣诚(1996—),男,硕士研究生,从事页岩油气富集机理方面研究。E-mail:821670843@qq.com。

通信作者:侯宇光(1979—),男,博士,副教授,博士生导师,从事油气成藏、非常规油气地质方面研究。E-mail:sporthyg@126.com。

基金项目:国家重点研发计划(2017YFE0106300)、国家自然科学基金项目(41772143)、中国地质调查局项目(DD20190561-1)和国家科技重大专项子课题(2016ZX05034002-003)联合资助。

basalt, the proportion of micropores increased while the content of mesopores and macropores decreased. It was speculated that the thermal effects of volcanic activities promoted the formation of organic pores and also affected the development of inorganic pores.

Key words: maturity; mineral composition; pore structure; shale reservoir; volcanic activity; Permian; Southern Guizhou Depression

页岩气是富集于泥页岩及夹层中、连续分布、自生自储的游离或吸附态气体^[1-3]。我国页岩气开发起步虽晚,却是继美加之后第三个形成规模和产业的国家,我国页岩气资源大约有 $23.5 \times 10^{12} \text{m}^3$ ^[4]。页岩气主要储集在孔隙和微裂缝中^[5],富有机质泥页岩中基本都存在有机孔隙^[6-7],在有机质中发现孔隙后,有机质才被认为是孔隙网络的贡献者。自这一发现以来,大量的研究致力于识别和表征页岩内部的重要微观结构特征,这些特征最终会反映泥页岩生烃和储存能力^[3-4],因此研究泥页岩储层的孔隙结构特征具有十分重要的意义。近年来,国内外的学者对富有机质泥页岩孔隙做了大量的研究工作,尤其在泥页岩储层孔隙表征、孔隙成因、孔隙定量评价和预测等方面取得了突破性的进展,但对含煤泥页岩层系在火山活动的影响下的孔隙特

征、生烃能力、物质组成等研究较少。火山活动是影响页岩生烃的重要因素,泥页岩储层的发育和破坏与岩浆侵入的距离、侵入体的厚度、侵入时间、热导率等有着密切的关系^[5-12]。火山活动带来的热源对泥页岩储层会产生重要的影响,一方面可以加速烃源岩的成熟,另一方面也可以影响页岩储集体的孔隙发育。本文以黔南拗陷二叠纪峨眉山玄武岩对龙潭组泥页岩的影响为例,研究了火山活动对含煤泥页岩生烃、矿物成分、储层孔隙结构等的影响。

1 区域地质概况

黔南拗陷属于滇黔桂含油区内的一个次级构造单元(图 1),处于特提斯和滨太平洋 2 大构造域的叠合部位,面积约为 $4.7 \times 10^4 \text{km}^2$ ^[13-14]。黔南拗

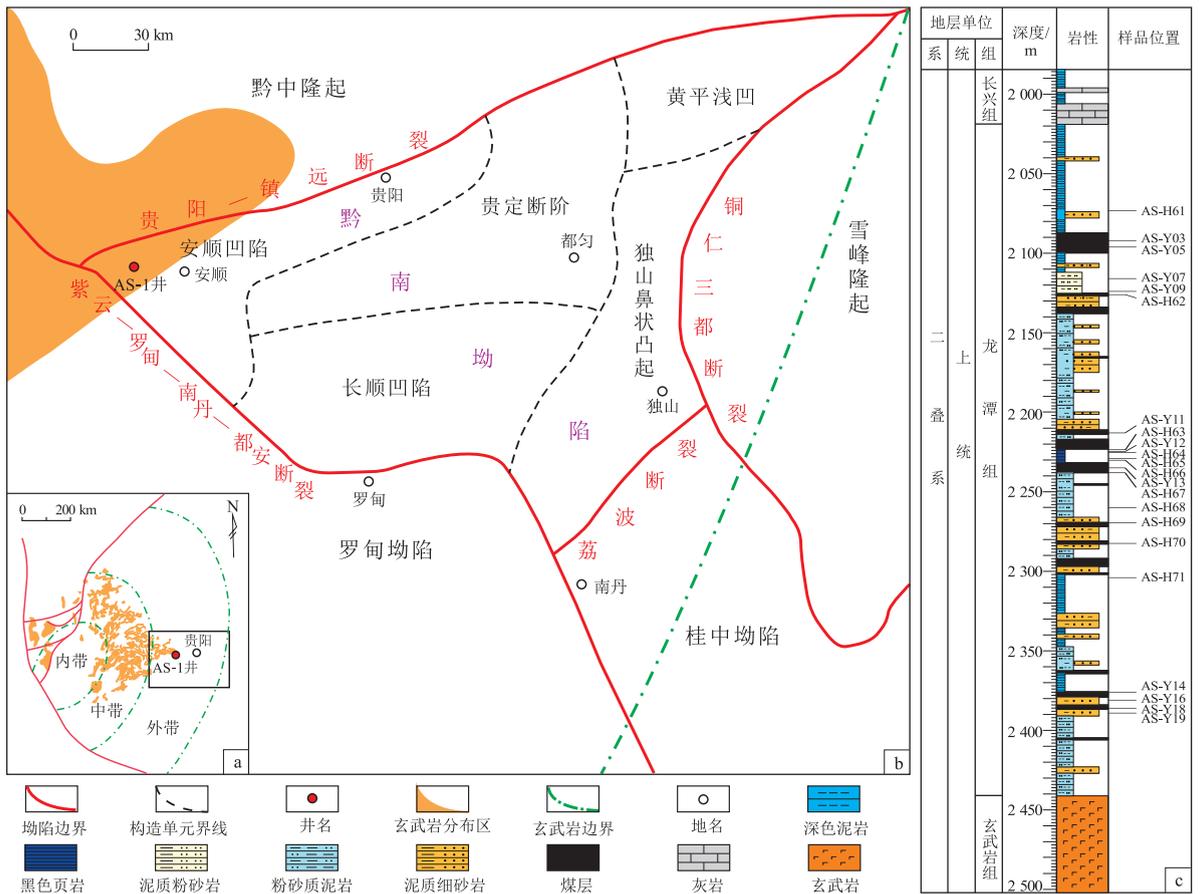


图 1 峨眉山玄武岩及研究区分布(a)、黔南拗陷区域构造单元划分(b)、AS-1 井岩性柱状图及样品位置(c)
Fig.1 Mount Emei basalt and location of research area (a), regional structural units of Southern Guizhou Depression (b), lithologic histogram and sampling location of well AS-1(c)

陷是一个由震旦系、古生界和三叠系充填的残留盆地。黔南坳陷北部以贵阳—镇远断裂带与黔中隆起为界,西以紫云—罗甸—南丹—都安断裂带与罗甸坳陷为界,东部以铜仁—三都断裂带与雪峰隆起为界,整体呈较完整的三角状展布^[13-14]。

本文研究对象为黔南坳陷西北部 AS-1 井的龙潭组,其构造位置位于黔南坳陷安顺凹陷普定复向斜带安顺岩性圈闭^[13-15]。安顺凹陷南与广顺低凸起以及长顺凹陷相邻,北以贵阳—镇远断裂带以及黔中隆起为界,东与贯定低凸起相接,处于隆起与坳陷的过渡带^[13-15](图 1b)。

黔南坳陷上二叠统主要岩性为深色泥岩、黑色页岩,其中灰色灰岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩和暗色泥岩呈不等厚互层;龙潭组为中厚层深色泥岩、黑色页岩、深灰色粉砂质泥岩夹灰色含泥细砂岩以及多层不等厚黑色煤层,龙潭组底部发育厚层玄武岩(厚约 60 m)^[15]。

峨眉山玄武岩作为大火成岩省,其喷发期发生在二叠纪乐平统沉积早期,侵入年代应为 258 Ma 左右,不同学者对其喷发的具体时间认识并非一致,误差在 1~2 Ma^[16-19],大体起始于晚二叠世早期,最长可持续至三叠纪。黔南坳陷二叠系玄武岩组隶属于峨眉山玄武岩,峨眉山玄武岩横跨川滇黔三省,贵州处于玄武岩大省的外圈范围,而研究区处于其外缘^[16-19]。黔南坳陷安顺凹陷 AS-1 井揭示的龙潭组正处在玄武岩组的上部。

2 样品与实验方法

样品取自黔南坳陷安顺凹陷 AS-1 井钻井岩心,深度分别为 2 075~2 127, 2 210~2 304, 2 375~2 390 m,对应龙潭组上、中、下部(图 1c);岩性主要为灰黑色泥岩、黑色碳质页岩和黑色煤。在该剖面详细的野外地质调查和测量基础上,采用 X 射

线衍射(XRD)、镜质体反射率(R_o)、总有机碳含量(TOC)以及二氧化碳和低温氮气吸附实验等方法,开展了含煤泥页岩矿物成分、有机地化和显微组构的研究,并探讨其对储层孔隙保存的影响。

粉碎的样品(200 目)经过盐酸处理后,利用 Elementar Analyzer Vario EL III 元素分析仪测得页岩有机碳含量;镜质体反射率在中国石化河南油田分公司勘探开发研究院测试中心完成;X 射线衍射(XRD)由中国石化勘探分公司委托进行测试。

气体吸附实验在中国地质大学(武汉)构造与油气资源教育部重点实验室完成。将龙潭组的样品碎至 60~80 目,利用康塔 Autosorb IQ3 型全自动比表面和孔径分布分析仪,开展低温氮气和二氧化碳吸附实验。气体吸附法对纳米孔隙的测量能得到很好的结果,在恒温条件下,随着相对压力的升高,氮气或二氧化碳逐渐吸附在固体颗粒表面,用吸附量—相对压力作图便能得到吸附曲线;当压力降低,气体逐渐从颗粒表面解吸,能得到脱附量,用脱附量—相对压力作图便能得到脱附曲线。根据 BET 方程、BJH 和 DFT 等数据模型,能得到比表面积以及微孔、介孔和宏孔的孔体积等数据。

3 结果分析

3.1 含煤泥页岩有机地化特征

AS-1 井二叠系龙潭组含煤泥页岩有机碳含量高,多数已经达到煤质,其有机碳含量为 41.5%~71.3%,平均值为 60.34%;镜质体反射率 R_o 为 2.04%~2.88%,均值为 2.45%。根据镜质体反射率与热演化阶段的划分方案,龙潭组含煤泥页岩样品属于过成熟阶段,处于生气带。

3.2 含煤泥页岩矿物组成

龙潭组含煤泥页岩的矿物组成如图 2 所示,黏土矿物含量最多,占 11.05%~70.78%,平均为

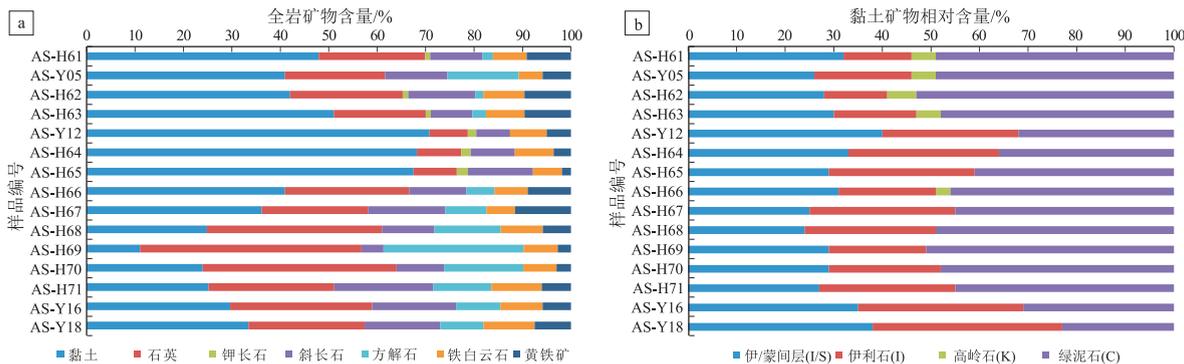


图 2 黔南坳陷 AS-1 井二叠系龙潭组含煤泥页岩全岩及黏土矿物含量
Fig.2 Whole rock (a) and clay mineral (b) contents of coal-bearing shale in Permian Longtan Formation, well AS-1, Southern Guizhou Depression

39.27%;其次为石英,含量在 7.93%~45.93%,平均为 23.33%;其他脆性矿物(钾长石、斜长石、方解石、铁白云石)之和占 16.29%~42.84%,平均为 28.73%;黄铁矿含量较少,占 1.85%~11.55%,平均为 6.4%。黏土矿物主要为伊蒙混层、伊利石、绿泥石和高岭石,伊蒙混层占 24%~40%,伊利石占 13%~39%,绿泥石占 23%~53%;部分样品中含有高岭石,占 3%~6%。石英和碳酸盐矿物含量变多时,相对应的黏土矿物含量就减少;伊蒙混层和伊利石随地层埋深而增加,而绿泥石含量则减少。

3.3 含煤泥页岩吸附能力及孔隙类型

含煤泥页岩二氧化碳吸附等温图(图 3)显示,二氧化碳的吸附量随着相对压力的增大而增多,曲线整体呈现出类似“上抛”的趋势,即每个样品所作的图都为 I 型等温曲线,泥页岩样品在低压力下(相对压力小于 0.01)时曲线上凸,且曲线在此压力下的斜率较大,吸附量增长速率较快,而随着压力的逐渐增大,曲线逐渐趋于平缓。含煤泥页岩吸附量为 12.02~20.73 cm³/g,其中,AS-Y16、AS-Y13、AS-Y12、AS-Y19、AS-Y14 的吸附量在 19.78~20.73 cm³/g,要稍大于其余样品的吸附量。根据样品深度并结合前面的分析,龙潭组的中下部

岩石对气体的吸附量要稍大于上部岩石的吸附量。

样品低温氮气吸附等温曲线(图 4)显示,当相对压力较低时(0~0.05),吸附曲线略微向上凸出,并呈缓慢增长的态势;当相对压力在中等程度的情况下(0.05~0.8),吸附量增长得极为缓慢,氮气等温吸附曲线在此阶段近乎于直线;在线性段以后,随着压力的升高(相对压力为 0.8~1),吸附剂对气体的吸附量剧烈上升,曲线呈现下凹的情况。本次实验发现,在 B 点(一般认为单层吸附容量的结束的标志)之后吸附曲线与脱附曲线就已经开始不再重合,脱附曲线位于吸附曲线的上面,形成滞后回线。滞后回线类型应该混有 H2 和 H3 两种特征,该类型滞后回线反映的是一种特殊的孔,即为细颈广体的墨水瓶孔,在地层中表现为微孔较发育。

由图 4 可见,样品 AS-Y03、AS-Y05、AS-Y07、AS-Y09、AS-Y11 的吸附、脱附等温曲线,在中、低压力的情况下吸附量上升缓慢,曲线前半部分较为平滑,而在相对压力(P/P_0)越接近 1 时,吸附量上升得越为迅速。另外 5 个样品(AS-Y12、AS-Y13、AS-Y14、AS-Y16、AS-Y19)的吸附曲线整体都在稳步上升,但在中等压力(相对压力为 0.4~0.6)条件下,相较于吸附曲线,脱附曲线斜率更大,上升较快。

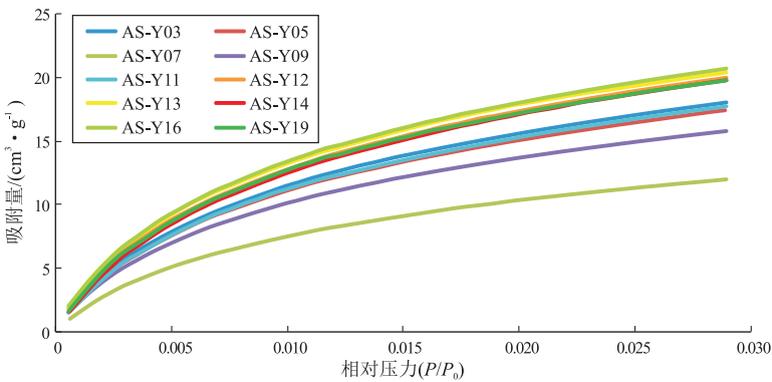


图 3 黔南坳陷 AS-1 井二叠系龙潭组二氧化碳吸附等温曲线

Fig.3 Isotherm curves of carbon dioxide adsorption of Permian Longtan Formation, well AS-1, Southern Guizhou Depression

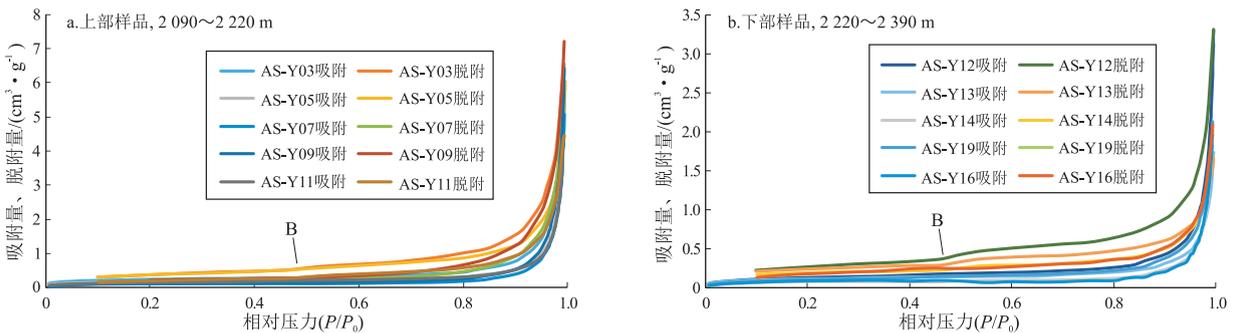


图 4 黔南坳陷 AS-1 井二叠系龙潭组氮气吸附—脱附等温曲线

Fig.4 Isotherm curves of nitrogen adsorption and desorption of Permian Longtan Formation, well AS-1, Southern Guizhou Depression

3.4 含煤泥页岩孔径分布特征

IUPAC 将孔径细分为微孔 (<2 nm)、介孔 (2~50 nm) 和宏孔 (>50 nm)。氮气和二氧化碳吸附结果显示 (表 1), 龙潭组含煤泥页岩样品微孔区孔体积为 0.037~0.061 cm³/g, 平均值为 0.055 cm³/g, 介孔区体积为 0.001~0.002 cm³/g, 平均值为 0.002 cm³/g, 宏孔区体积为 0.001~0.009 cm³/g, 平均值为 0.005 cm³/g, 表明样品中发育不同尺度的孔隙, 构造了含煤泥页岩复杂的孔隙体系。其中, 样品以

表 1 黔南坳陷 AS-1 井二叠系龙潭组含煤泥页岩样品 N₂ 和 CO₂ 气体吸附测试结果

Table 1 Test results of N₂ and CO₂ adsorptions of coal-bearing shale in Permian Longtan Formation, well AS-1, Southern Guizhou Depression

样品编号	体积/(cm ³ ·g ⁻¹)			比表面积/(m ² ·g ⁻¹)		
	微孔	介孔	宏孔	微孔	介孔	宏孔
AS-Y03	0.056	0.002	0.008	190.268	0.410	0.261
AS-Y05	0.055	0.002	0.007	182.937	0.279	0.217
AS-Y07	0.037	0.002	0.007	125.215	0.223	0.221
AS-Y09	0.049	0.002	0.009	165.33	0.305	0.293
AS-Y11	0.055	0.001	0.006	184.311	0.276	0.184
AS-Y12	0.061	0.001	0.004	207.66	0.225	0.124
AS-Y13	0.060	0.001	0.002	209.959	0.142	0.055
AS-Y14	0.059	0.001	0.002	203.882	0.135	0.079
AS-Y16	0.061	0.002	0.001	212.138	0.161	0.083
AS-Y19	0.059	0.001	0.003	204.052	0.222	0.090

微孔为主 (图 5), 占 89.34%, 介孔占 2.49%, 宏孔占 8.17%。含煤泥页岩的孔体积与深度具有一定的相关性, 上部样品 (AS-Y03、AS-Y05、AS-Y07、AS-Y09、AS-Y11) 的微孔、介孔和宏孔数据与下部样品孔隙体积存在明显差别。上部样品的微孔孔体积占比要稍低于下部样品, 而介孔和宏孔的孔体积占比则相反。

含煤泥页岩样品的比表面积为 125.659~212.382 m²/g, 平均为 188.974 m²/g, 微孔的比表面积占 99.64%~99.91%, 平均为 99.78%, 证明含煤泥页岩比表面积主要由微孔提供, 其比表面积较大, 易于气体的吸附。

4 讨论

4.1 火山活动对有机质生烃的影响

前人研究表明, 由于岩浆岩冷却释放的热量, 其周围地层泥页岩的有机质镜质体反射率能够迅速升高^[20], 成熟度可以从 0.5% 升高至 4.0%, 总有机碳含量逐渐降低^[20-22]。其他地化参数 (如 S₁、S₂ 等) 显示靠近岩浆岩生烃强度大, 远离岩浆岩生烃强度小, 表示与岩浆岩距离不同, 有机质生烃强度也存在差异^[1, 21-22]。

龙潭组下部与玄武岩距离较近, 含煤泥页岩的

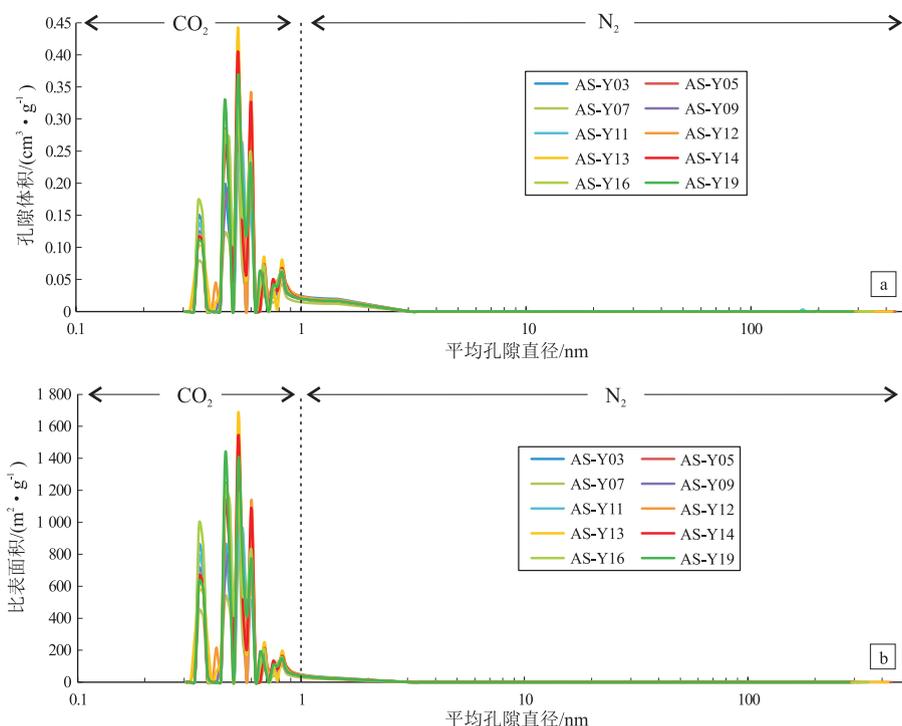


图 5 黔南坳陷 AS-1 井二叠系龙潭组孔隙体积 (a)、比表面积 (b) 与平均孔隙直径的关系

Fig.5 Correlations between average pore diameter and pore volume (a) and specific surface area (b) of Permian Longtan Formation, well AS-1, Southern Guizhou Depression

镜质体反射率最高可达 2.88%, 远远高于地层正常埋深热演化所能达到的成熟度, 说明岩浆侵入可能导致含煤泥页岩的成熟度升高, 加速有机质的生烃演化。岩浆的烘烤作用影响范围随着侵入体的厚度、离侵入体的距离等因素变化, 一般岩浆岩越厚, 距离岩浆岩越近, 对有机质生烃的影响也就越大^[22]。根据实测的镜质体反射率数值, 可将龙潭组含煤泥页岩分为上、下两部分。龙潭组上部镜质体反射率明显更低, 表明泥页岩地层受火山活动影响较小, 其演化程度与下伏石炭系摆佐组相当^[23], 经历了正常的埋深压实的热演化; 而龙潭组下部(大致 2 200 m 以下)镜质体反射率明显增大, 很可能是受火山活动影响, 导致热演化速率提升, 迅速达到过成熟阶段, 并开始大量生气。前人研究认为, 较早进入干气阶段和快速生烃, 对于页岩储层天然气的长期补充和保存是不利的^[24-25]。

研究区龙潭组含煤泥页岩的有机质含量高, 而 TOC 含量与生气能力往往成正相关关系。参考煤系泥页岩的烃源岩评价标准^[26], 黔南坳陷二叠系龙潭组 AS-1 井岩心样品 TOC 主体大于 6%, 为好—很好烃源岩。受到火山活动的影响, 有机质逐渐被消耗, 随着与岩浆岩距离减小, 残余碳含量相应降低, 但残余碳含量还会受到无机质(石墨)的影响^[27], 导致 TOC 含量变化不大(图 6)。泥页岩的 TOC 含量越高, 其生烃潜力便越强。但是与海相或者陆相泥页岩相比, 二叠系龙潭组作为海陆交

互相, 含煤泥页岩中有机质的差异性较大, 表现出典型的富碳贫氧特征, 生烃潜力较弱^[28]。

4.2 火山活动对页岩物质组成的影响

随着泥页岩储层与峨眉山玄武岩的距离逐渐缩小, 泥页岩的矿物组成也出现了一定的变化规律(图 6)。研究区龙潭组含煤泥页岩矿物组成大致可以分为三类: 碎屑矿物、碳酸盐矿物和黏土矿物。石英和长石是碎屑矿物的主要组成, 石英含量平均为 23.96%, 长石含量平均为 12.75%。随着埋深增加, 靠近侵入岩体, 石英含量逐渐升高。石英的相对富集可能是与火山活动促使临近泥页岩发生硅质流体交代作用有关^[27]。龙潭组含煤泥页岩的碳酸盐矿物主要为方解石和铁白云石, 而方解石和铁白云石的平均含量都不到 10%, 含量较低。随着与岩浆岩的距离减小, 碳酸盐矿物的总含量有所增加, 页岩中也逐渐见到含铁碳酸盐胶结物(铁白云石), 其含量的增高一般出现在晚成岩阶段, 它也可能是岩浆热作用促进泥页岩成岩演化进程的结果^[22]。龙潭组泥页岩黏土矿物多为伊蒙间层、伊利石、高岭石、绿泥石。黏土矿物总量、伊利石和绿泥石矿物的相对含量都随着埋深与岩体逐渐靠近呈现出规律性的变化, 黏土矿物总量和绿泥石呈现降低趋势, 而伊利石含量逐渐增加, 推测与岩浆岩距离减小、温度升高及不同类型黏土矿物之间的转化相关。一般来说, 在富 K⁺ 环境中蒙脱石更易发生伊利石化, 碱性环境下则更有利于绿泥石的稳定

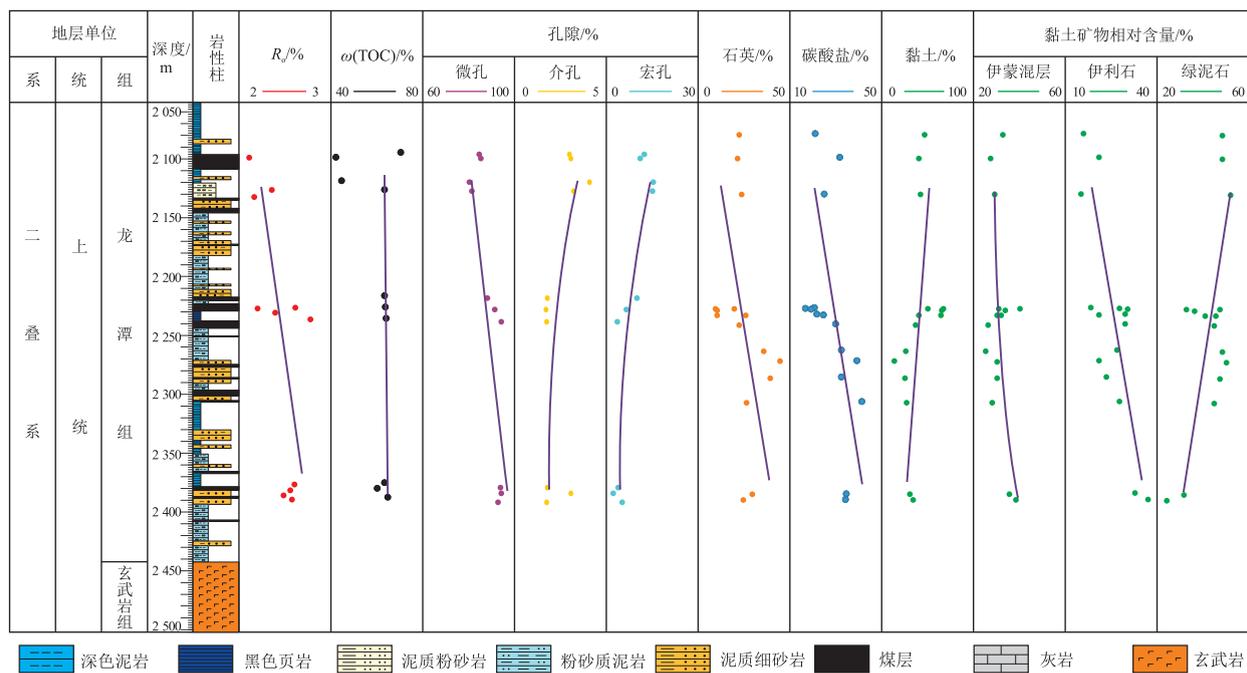


图 6 黔南坳陷 AS-1 井二叠系龙潭组含煤泥页岩样品实验数据分布

Fig.6 Experimental data distribution of coal-bearing shale in Permian Longtan Formation, well AS-1, Southern Guizhou Depression

存在。玄武岩是一种基性岩浆岩,化学成分中 K^+ 含量较侵入岩略高,而 Fe^{2+} 和 Mg^{2+} 相对较低,可能对其附近含煤泥页岩储层富 K^+ 流体环境的形成有一定的促进作用,从而有利于发生蒙脱石的伊利石化。钾长石仅存在于龙潭组上部,可能也与伊利石化的消耗有关^[29]。龙潭组下部样品中几乎不含“亲水”矿物蒙脱石,伊蒙混层含量也较少,表明越靠近玄武岩,蒙脱石向伊利石转化越强,绿泥石含量逐渐减少^[29]。

4.3 火山活动对储层孔隙结构的影响

火山活动对储层孔隙结构主要有 2 个方面的影响。

(1) 随着与岩浆岩的距离减小,其对围岩的烘烤作用使得过成熟的有机质进一步分解,有机质孔隙的发育也会发生相应变化^[1-2]。大量研究^[1,7-11]发现,泥页岩储层在进入高成熟和过成熟阶段会发育大量的有机质纳米孔隙,而在未成熟和低成熟阶段,页岩中干酪根不发育或较少发育纳米级孔隙。研究区龙潭组含煤页岩的有机质丰度高,热演化程度高,已进入大规模热裂解生干气阶段,达到了有机质孔隙大规模发育的演化阶段。前人研究认为^[27],岩浆岩的烘烤作用使得有机质逐渐分解,原本的纳米级孔隙受到破坏,而随着与岩浆岩距离的增加,可能导致泥页岩孔隙中的流体增加,孔隙压力增大进而发生破裂,使泥页岩中介孔及宏孔增多。在早期成岩阶段,受火山活动的影响,有机质孔隙会大量发育^[30]。孔径分布特征(图 6)显示,随着距离岩浆岩由远及近,含煤泥页岩储层中的微孔含量显著增加,中孔和宏孔则呈现降低趋势。有机质孔隙主要以微孔为主,而有机碳含量越高,有机质孔隙直径也越小。因此,本次研究的孔径变化规律应该是受火山活动的增温作用,导致有机质微孔的大量生成所致。

(2) 受火山活动的影响,靠近岩浆岩的含煤泥页岩中碎屑矿物和碳酸盐矿物含量增加,黏土含量减少,也会影响无机孔隙的发育。长石和石英作为脆性矿物的重要组成部分,与周围的作为塑性的泥岩之间可能会存在粒间孔隙,且高石英含量将有利于页岩后期的改造压裂。研究区含煤泥页岩的石英和长石含量大致相当,长石和碳酸盐矿物在成岩阶段过程中易被溶蚀,形成少量次生孔隙,会一定程度增加页岩的孔隙空间,改善储层物性特征^[31]。前人研究发现^[32],在 SiO_2 含量较高时,页岩储层以发育宏孔为主,随着 SiO_2/Al_2O_3 比值增加,孔隙类型由微孔和中孔向宏孔转变。然而,龙潭组石英与

黏土矿物的比值随埋深呈增加趋势,与微孔增加对应,而非中孔和宏孔的增长,这一趋势也可以说明,龙潭组孔隙结构的变化主要与火山活动促进了有机质生烃演化相关。

5 结论

(1) 受玄武质火山活动的影响,黔南坳陷龙潭组含煤泥页岩已进入过成熟阶段,明显高于地层正常埋深热演化所能达到的成熟度,岩浆侵入促进了有机质的生烃演化,整体进入干气阶段。

(2) 火山活动使页岩矿物组成发生了变化,靠近岩浆岩的泥页岩中石英和碳酸盐矿物含量增加,黏土含量减少;受储层流体环境和增温作用影响,伊利石和绿泥石含量也呈现规律变化。

(3) 龙潭组含煤泥页岩的孔径为 0.3~450 nm,以微孔为主,孔隙形状为细颈广体的墨水瓶孔。页岩孔径分布特征显示,距离岩浆侵入体越近,微孔占比增高,而介孔和宏孔含量下降,这可能与火山活动促使有机质孔隙大规模发育有关。

参考文献:

- [1] CURTIS M E, CARDOTT B J, SONDERGELD C H, et al. Development of organic porosity in the Woodford shale with increasing thermal maturity[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2012, 103: 26-31.
- [2] CURTIS M E, SONDERGELD C H, AMBROSE R J, et al. Microstructural investigation of gas shales in two and three dimensions using nanometer-scale resolution imaging[J]. *AAPG Bulletin*, 2012, 96(4): 665-677.
- [3] 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.
ZHANG Jinchuan, JIN Zhijun, YUAN Mingsheng. Reservoiring mechanism of shale gas and its distribution[J]. *Natural Gas Industry*, 2004, 24(7): 15-18.
- [4] 张金川, 徐波, 聂海宽, 等. 中国页岩气资源勘探潜力[J]. *天然气工业*, 2008, 28(6): 136-140.
ZHANG Jinchuan, XU Bo, NIE Haikuan, et al. Exploration potential of shale gas resources in China[J]. *Natural Gas Industry*, 2008, 28(6): 136-140.
- [5] SLATT R M, O' BRIEN N R. Pore types in the Barnett and Woodford gas shales: contribution to understanding gas storage and migration pathways in fine-grained rocks[J]. *AAPG Bulletin*, 2011, 95(12): 2017-2030.
- [6] LOUCKS R G, REED R M, RUPPEL S C, et al. Morphology, genesis, and distribution of nanometer-scale pores in siliceous mudstones of the Mississippian Barnett shale[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2009, 79(12): 848-861.
- [7] 田华, 张水昌, 柳少波, 等. 压汞法和气体吸附法研究富有机质页岩孔隙特征[J]. *石油学报*, 2012, 33(3): 419-427.

- TIAN Hua, ZHANG Shuichang, LIU Shaobo, et al. Determination of organic-rich shale pore features by mercury injection and gas adsorption methods[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(3): 419-427.
- [8] MASTALERZ M, SCHIMMELMANN A, DROBNIAK A, et al. Porosity of Devonian and Mississippian New Albany shale across a maturation gradient: insights from organic petrology, gas adsorption, and mercury intrusion [J]. *AAPG Bulletin*, 2013, 97(10): 1621-1643.
- [9] MILLIKEN K L, RUDNICKI M, AWWILLER D N, et al. Organic matter-hosted pore system, Marcellus Formation (Devonian), Pennsylvania [J]. *AAPG Bulletin*, 2013, 97(2): 177-200.
- [10] 吉利明, 吴远东, 贺聪, 等. 富有机质泥页岩高压生烃模拟与孔隙演化特征[J]. *石油学报*, 2016, 37(2): 172-181.
- Ji Liming, WU Yuandong, HE Cong, et al. High-pressure hydrocarbon-generation simulation and pore evolution characteristics of organic-rich mudstone and shale [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(2): 172-181.
- [11] 马中良, 郑伦举, 徐旭辉, 等. 富有机质页岩有机孔隙形成与演化的热模拟实验[J]. *石油学报*, 2017, 38(1): 23-30.
- MA Zhongliang, ZHENG Lunju, XU Xuhui, et al. Thermal simulation experiment on the formation and evolution of organic pores in organic-rich shale [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(1): 23-30.
- [12] 王民, 卢双舫, 薛海涛, 等. 岩浆侵入体对有机质生烃(成熟)作用的影响及数值模拟[J]. *岩石学报*, 2010, 26(1): 177-184.
- WANG Min, LU Shuangfang, XUE Haitao, et al. The effects of magmatic intrusions on the maturation of organic matter and its numerical simulation [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(1): 177-184.
- [13] CHEN Ji, XIAO Xianming. Evolution of nanoporosity in organic-rich shales during thermal maturation [J]. *Fuel*, 2014, 129: 173-181.
- [14] 徐政语, 姚根顺, 郭庆新, 等. 黔南坳陷构造变形特征及其成因解析[J]. *大地构造与成矿学*, 2010, 34(1): 20-31.
- XU Zhengyu, YAO Genshun, GUO Qingxin, et al. Genetic interpretation about geotectonics and structural transfiguration of the Southern Guizhou Depression [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2010, 34(1): 20-31.
- [15] 张江江. 黔南坳陷构造演化研究[D]. 青岛: 中国石油大学, 2010.
- ZHANG Jiangjiang. The research of tectonic evolution in Southern Guizhou Depression [D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2010.
- [16] 王民, 王岩, 卢双舫, 等. 岩浆侵入体热作用对烃源岩生烃影响的定量表征: 以松辽盆地南部英台凹陷为例[J]. *断块油气田*, 2014, 21(2): 171-175.
- WANG Min, WANG Yan, LU Shuangfang, et al. Thermal influence of magma intrusion on hydrocarbon generation of source rock: taking south Yingtai Fault Depression of Songliao Basin as an example [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2014, 21(2): 171-175.
- [17] 聂爱国, 秦德先, 管代云, 等. 峨眉山玄武岩喷发对贵州西部区域成矿贡献研究[J]. *地质与勘探*, 2007, 43(2): 50-54.
- NIE Aiguo, QIN Dexian, GUAN Daiyun, et al. A research on regional metallogenic contribution to gushing Emeishan basalt magma in western of Guizhou province [J]. *Geology and Prospecting*, 2007, 43(2): 50-54.
- [18] 何斌, 徐义刚, 肖龙, 等. 峨眉山大火成岩省的形成机制及空间展布: 来自沉积地层学的新证据[J]. *地质学报*, 2003, 77(2): 194-202.
- HE Bin, XU Yigang, XIAO Long, et al. Generation and spatial distribution of the Emeishan large igneous province: new evidence from stratigraphic records [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2003, 77(2): 194-202.
- [19] 徐义刚, 何斌, 罗震宇, 等. 我国大火成岩省和地幔柱研究进展与展望[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2013, 32(1): 25-39.
- XU Yigang, HE Bin, LUO Zhenyu, et al. Study on mantle plume and large igneous provinces in China: an overview and perspectives [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2013, 32(1): 25-39.
- [20] 陈荣书, 何生, 王青玲, 等. 岩浆活动对有机质成熟作用的影响初探: 以冀中葛渔城—文安地区为例[J]. *石油勘探与开发*, 1989, 16(1): 29-37.
- CHEN Rongshu, HE Sheng, WANG Qingling, et al. A preliminary discussion of magma activity on the maturation of organic matter: taking Geyucheng—Wenan area of Hebei province as an example [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1989, 16(1): 29-37.
- [21] 何生, 陈荣书, 兰廷泽. 冀中文安斜坡石炭—二叠纪煤系特征及岩浆热成烃作用[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 1992, 17(6): 699-708.
- HE Sheng, CHEN Rongshu, LAN Tingze. Coal formation characteristics of Carboniferous—Permian and magmatic thermal power hydrocarbon-generating in Wenan slope, Jizhong Depression [J]. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 1992, 17(6): 699-708.
- [22] 万从礼, 金强. 东营凹陷纯西辉长岩对烃源岩异常生排烃作用研究[J]. *长安大学学报(地球科学版)*, 2003, 25(1): 20-25.
- WAN Congli, JIN Qiang. Study on exceptional hydrocarbons generating and eliminating of Gabbros to source rocks in Chunxi area of Dongying Depression [J]. *Journal of Chang'an University (Earth Science Edition)*, 2003, 25(1): 20-25.
- [23] 宋颖睿, 侯宇光, 刘宇坤, 等. 黔南坳陷下石炭统摆伍组暗色页岩热演化与生烃史研究[J]. *石油实验地质*, 2018, 40(2): 226-232.
- SONG Yingrui, HOU Yuguang, LIU Yukun, et al. Thermal evolution and hydrocarbon generation histories of black shale in Lower Carboniferous Baizuo Formation, Southern Guizhou Depression [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2018, 40(2): 226-232.
- [24] 何治亮, 聂海宽, 张钰莹. 四川盆地及其周缘奥陶系五峰组—志留系龙马溪组页岩气富集主控因素分析[J]. *地质前缘*, 2016, 23(2): 8-17.
- HE Zhiliang, NIE Haikuan, ZHANG Yuying. The main factors of shale gas enrichment of Ordovician Wufeng Formation—Silurian Longmaxi Formation in the Sichuan Basin and its adjacent areas [J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(2): 8-17.
- [25] 翟刚毅, 王玉芳, 包书景, 等. 我国南方海相页岩气富集高产主控因素及前景预测[J]. *地球科学*, 2017, 42(7): 1057-1068.
- ZHAI Gangyi, WANG Yufang, BAO Shujing, et al. Major factors controlling the accumulation and high productivity of marine shale gas and prospect forecast in southern China [J]. *Earth Science*, 2017, 42(7): 1057-1068.

- ZHU Xiaomin, WU Dong, ZHANG Xin, et al. Genesis of low permeability reservoirs of nearshore subaqueous fan in Shahejie Formation in Dongying Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(5): 646-653.
- [20] 周军良, 胡勇, 李超, 等. 渤海 A 油田扇三角洲相低渗储层特征及物性控制因素 [J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(1): 71-78.
- ZHOU Junliang, HU Yong, LI Chao, et al. Characteristics and controlling factors of fan delta facies low permeability reservoirs in Bohai A oilfield, the Bohai Bay Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(1): 71-78.
- [21] 马羚, 李杰, 徐胜林, 等. 三塘湖盆地马朗凹陷西山窑组储层成岩作用类型及特征 [J]. *石油实验地质*, 2019, 41(4): 508-515.
- MA Ling, LI Jie, XU Shenglin, et al. Diagenesis types and characteristics of Xishanyao Formation in Malang Sag, Santanghu Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2019, 41(4): 508-515.
- [22] 韩志艳. 松辽盆地梨树断陷营城组—沙河子组成岩作用及对优质储层的控制 [J]. *石油实验地质*, 2019, 41(3): 398-403.
- HAN Zhiyan. Diagenesis controls on high-quality reservoirs of the Yingcheng-Shahezi formations in the Lishu Fault Depression, Songliao Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2019, 41(3): 398-403.
- [23] 肖晖, 王浩男, 杨引弟, 等. 致密砂岩孔隙演化特征及其成岩作用对储层质量的影响: 以鄂尔多斯盆地马岭南延长组长 8 储层为例 [J]. *石油实验地质*, 2019, 41(6): 800-811.
- XIAO Hui, WANG Haonan, YANG Yindi, et al. Influence of diagenetic evolution on tight sandstone reservoir flow capacity: Chang 8 reservoir of Yanchang Formation in southern Maling, Ordos Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2019, 41(6): 800-811.
- [24] 魏巍, 朱筱敏, 谈明轩, 等. 查干凹陷下白垩统扇三角洲相储层特征及物性影响因素 [J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(3): 447-455.
- WEI Wei, ZHU Xiaomin, TAN Mingxuan, et al. Reservoir characteristics and influences on poroperm characteristics of the Lower Cretaceous fan-delta facies in Chagan Depression [J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(3): 447-455.
- [25] 钟大康, 朱筱敏, 周新源, 等. 次生孔隙形成期次与溶蚀机理: 以塔中地区志留系沥青砂岩为例 [J]. *天然气工业*, 2006, 26(9): 21-24.
- ZHONG Dakang, ZHU Xiaomin, ZHOU Xinyuan, et al. Phases of secondary pore generation and dissolution mechanism: taking Silurian asphaltic sandstone in central Tarim Basin as an example [J]. *Natural Gas Industry*, 2006, 26(9): 21-24.
- [26] 李春荣, 张功成, 梁建设. 北部湾盆地断裂构造特征及其对油气的控制作用 [J]. *石油学报*, 2012, 33(2): 195-203.
- LI Chunrong, ZHANG Gongcheng, LIANG Jianshe. Characteristics of fault structure and its control on hydrocarbons in the Beibuwan Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(2): 195-203.
- [27] 朱伟林, 江文荣. 北部湾盆地涠西南凹陷断裂与油气藏 [J]. *石油学报*, 1998, 19(3): 6-10.
- ZHU Weilin, JIANG Wenrong. Relations between fractures and hydrocarbon reservoirs in Weixinan Sag [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1998, 19(3): 6-10.
- [28] NEDKVITNE T, KARLSEN D A, BJØRLYKKE K, et al. Relationship between reservoir diagenetic evolution and petroleum emplacement in the Ula field, North Sea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1993, 10(3): 255-270.
- [29] SURDAM R C, CROSSEY L J, HAGEN E S, et al. Organic-inorganic interactions and sandstone diagenesis [J]. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1989, 73(1): 1-23.
- (编辑 黄娟)
- ~~~~~
- (上接第 627 页)
- [26] 侯杰杰, 冯子辉. 油气地球化学 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2011.
- HOU Dujie, FENG Zihui. *Petroleum geochemistry* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.
- [27] 李霞. 花岗岩侵入对页岩成分和孔隙结构的影响 [D]. 南京: 南京大学, 2016.
- LI Xia. Influence of granite intrusion on the mineralogy and pore structure of shales [D]. Nanjing: Nanjing University, 2016.
- [28] 邓恩德, 颜智华, 姜秉仁, 等. 黔西地区上二叠统龙潭组海陆交互相页岩气储层特征 [J]. *石油实验地质*, 2020, 42(3): 467-476.
- DENG Ende, YAN Zhihua, JIANG Bingren, et al. Reservoir characteristics of marine-continental shale gas in Upper Permian Longtan Formation, western Guizhou province [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2020, 42(3): 467-476.
- [29] LI Yingli, CAI Jingong, WANG Xuejun, et al. Smectite-illitization difference of source rocks developed in saline and fresh water environments and its influence on hydrocarbon generation: a study from the Shahejie Formation, Dongying Depression, China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 80: 349-357.
- [30] 程璇, 徐尚, 郝芳, 等. 松辽盆地嫩江组富有机质页岩有机孔隙成因 [J]. *地质科技情报*, 2019, 38(4): 62-69.
- CHENG Xuan, XU Shang, HAO Fang, et al. Origin of organic pores in the organic-rich shale of Nenjiang Formation, Songliao Basin, China [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2019, 38(4): 62-69.
- [31] 朱筱敏, 王英国, 钟大康, 等. 济阳拗陷古近系储层孔隙类型与次生孔隙成因 [J]. *地质学报*, 2007, 81(2): 197-204.
- ZHU Xiaomin, WANG Yingguo, ZHONG Dakang, et al. Pore types and secondary pore evolution of Paleogene reservoir in the Jiyang Sag [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(2): 197-204.
- [32] 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.
- (编辑 徐文明)