

文章编号: 0253-2697(2017)12-1371-10 DOI:10.7623/syxb201712004

海相页岩中斑脱岩发育特征及对页岩储层品质的影响

——以涪陵地区五峰组—龙马溪组一段为例

舒逸¹ 陆永潮¹ 刘占红² 王超³ 毛华武¹

(1. 中国地质大学资源学院 湖北武汉 430074; 2. 中国地质大学海洋学院 湖北武汉 430074;
3. 中国石油化工股份有限公司江汉油田分公司勘探开发研究院 湖北武汉 430223)

摘要:以岩心精细描述为基础,借助全岩/黏土X射线衍射分析、氩离子抛光扫描电镜等测试技术,从斑脱岩发育特征、页岩储层品质和储层品质差异性发育机理3个方面,对涪陵地区上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组一段海相页岩中斑脱岩的发育特征及其与页岩储层品质之间的关系进行了研究。研究表明,本地区上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组一段共发育42层斑脱岩层,结合斑脱岩层单层厚度和层间厚度,将其划分为密集发育段、较发育段和欠发育段3个阶段。通过对比不同发育段页岩储层品质特征发现,较发育段具有高脆性矿物、高有机碳含量和高含气性的特征,为最有利页岩储层发育段。此外,从古海洋氧化还原环境和古生产力2个方面阐述了间发性火山活动是导致沉积期氧化还原环境变化的主要原因,且适度的火山活动有利于有机质和生物成因硅质矿物的富集,促进了优质页岩的形成。

关键词:海相页岩;斑脱岩;储层品质;五峰组—龙马溪组;涪陵地区

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Development characteristics of bentonite in marine shale and its effect on shale reservoir quality: a case study of Wufeng Formation to Member 1 of Longmaxi Formation, Fuling area

Shu Yi¹ Lu Yongchao¹ Liu Zhanhong² Wang Chao³ Mao Huawu¹

(1. Faculty of Earth Resource, China University of Geosciences, Hubei Wuhan 430074, China; 2. College of Marine Science and Technology, China University of Geosciences, Hubei Wuhan, 430074; 3. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Sinopec Jiangnan Oilfield Company, Hubei Wuhan 430223, China)

Abstract:Based on fine core description, whole rock/clay X-ray diffraction analysis, argon ion polishing scanning electron microscopy and other test technologies, the development characteristics of bentonite in the marine shale of Upper Ordovician Wufeng Formation-Lower Silurian Member 1 of Longmaxi Formation, Fuling area are studied as well as its relationship with shale reservoir quality from three aspects, i. e., the development characteristics of bentonite, shale reservoir quality and the development mechanism of reservoir quality difference. The results show that there are totally 42 sets of bentonite layers developed in the regional Wufeng Formation-Member 1 of Longmaxi Formation. According to the single-layer and inter-layer thickness of bentonite, such bentonite layers are classified into three stages, i. e., densely developed stage, relatively developed stage and less developed stage. Through comparing the characteristics of shale reservoir quality in different development stages, it is found that the shale reservoir in the relatively development stage has high brittle mineral, high organic carbon content and high gas content, proven as the most favorable shale reservoir development stage. Furthermore, it is explained from two aspects of paleo-ocean redox conditions and paleo-productivity that discrete volcanic eruptions might be the main reason for the changes in the redox conditions during the deposition. Meanwhile, moderate volcanic activity is beneficial to the enrichment of organic matter and siliceous minerals, which also favors the formation of high-quality shale.

Key words:marine shale; bentonite; reservoir quality; Wufeng Formation-Longmaxi Formation; Fuling area

引用:舒逸,陆永潮,刘占红,王超,毛华武.海相页岩中斑脱岩发育特征及对页岩储层品质的影响——以涪陵地区五峰组—龙马溪组一段为例[J].石油学报,2017(38),1371-1381.

Cite:SHU Yi,LU Yongchao,LIU Zhanhong,WANG Chao,MAO Huawu.Development characteristics of bentonite in marine shale and its effect on shale reservoir quality:a case study of Wufeng Formation to Member 1 of Longmaxi Formation,Fuling area [J].Acta Petrolei Sinica,2017(38),1371-1381.

基金项目:国家重大科技专项(2016ZX05060-004)及国家自然科学基金项目(No.41690131, No.41772148, No.41702149)资助。

第一作者及通信作者:舒逸,男,1992年9月生,2016年获武汉工程科技学院学士学位,现为中国地质大学(武汉)资源学院矿产普查与勘探专业硕士研究生,主要从事沉积储层方面的研究。Email:cug_sy904@sina.com

页岩气储层是一种非常规天然气储层,具有自生自储、富有机质、纳米级孔隙结构等一系列区别于常规油气储层的特征^[1-4],其储层孔隙表征和成因机理一直是页岩气基础地质研究的热点问题之一。中国南方上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组一段(简称五峰组一龙一段)海相页岩的成功商业性开发,证实了该套页岩具有巨大的页岩气资源潜力^[5]。但该套页岩岩相类型多样,不同岩相的储层品质差异性较强^[6-9],故从页岩发育的沉积地质背景,尤其是特殊地质事件,剖析沉积环境对页岩储层品质的影响,可对页岩气勘探开发及资源潜力评价提供重要的参考及借鉴。

目前,国内外学者已从页岩岩相划分、古环境恢复、沉积过程等方面开展了沉积地质背景对页岩储层品质影响的一系列研究^[10-15]。Li等^[16]指出自五峰组至龙马溪组沉积期,沉积盆地由极度局限向适度局限过渡,而盆地性质及水体分层形成的缺氧环境有利于有机质保存;Ma等^[17]指出龙马溪组下部硅质和有机质富集是由于该时期藻类大规模爆发所引起的;朱逸青等^[6]在利用矿物组分、石英含量和纹层类型3类指标划分页岩岩相基础上,指出了不同岩相储层品质差异性;赵建华等^[11]认为五峰组一龙马溪组页岩沉积环境既包含低能水动力环境,同时也存在底流作用等高能水动力环境,且沉积环境决定了富有机质的形成。虽然在基于沉积环境开展页岩储层发育研究方面已进行了大量研究,但作为特殊地质事件的产物,广泛发育

于上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组的多期斑脱岩层尚未引起足够关注。21世纪初期,苏文博等^[18]首次在中国主要地台区同期地层中识别出一系列具有良好地层对比潜力的火山活动沉积记录(斑脱岩层),并将此运用于扬子地台奥陶纪-志留纪之交的高精度地层学研究;胡艳华等^[19]指出斑脱岩为火山喷发的凝灰质物质在海相环境沉积、蚀变的产物,且火山活动可能是造成晚奥陶世生物大灭绝和冈瓦纳冰川的主要诱导因素。国内学者之前多从年代地层、岩石矿物学、地球化学等角度确定这些斑脱岩层的成因及与火山喷发事件的关系^[18-19],而针对多期斑脱岩发育对页岩储层品质影响方面目前尚未开展系统研究。

本次研究以四川盆地涪陵地区上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组一段海相页岩中的斑脱岩层为研究对象,基于岩心观测和地球化学特征分析,从斑脱岩发育特征入手,剖析斑脱岩发育期的沉积环境变化及其对页岩储层品质的影响。

1 地质背景

四川盆地是一个在上扬子克拉通基础上发展起来的叠合型盆地,以华蓥山和龙泉山两个背斜带为界,亦可划分为川东南斜坡高陡构造区(包括川东高陡褶皱带和川南低陡褶皱带)、川西坳陷低陡构造区和川中隆起低缓构造区[图1(a)]。研究区位于四川盆地川东高陡褶皱带,受多期构造运动叠加影响,边界发育NE

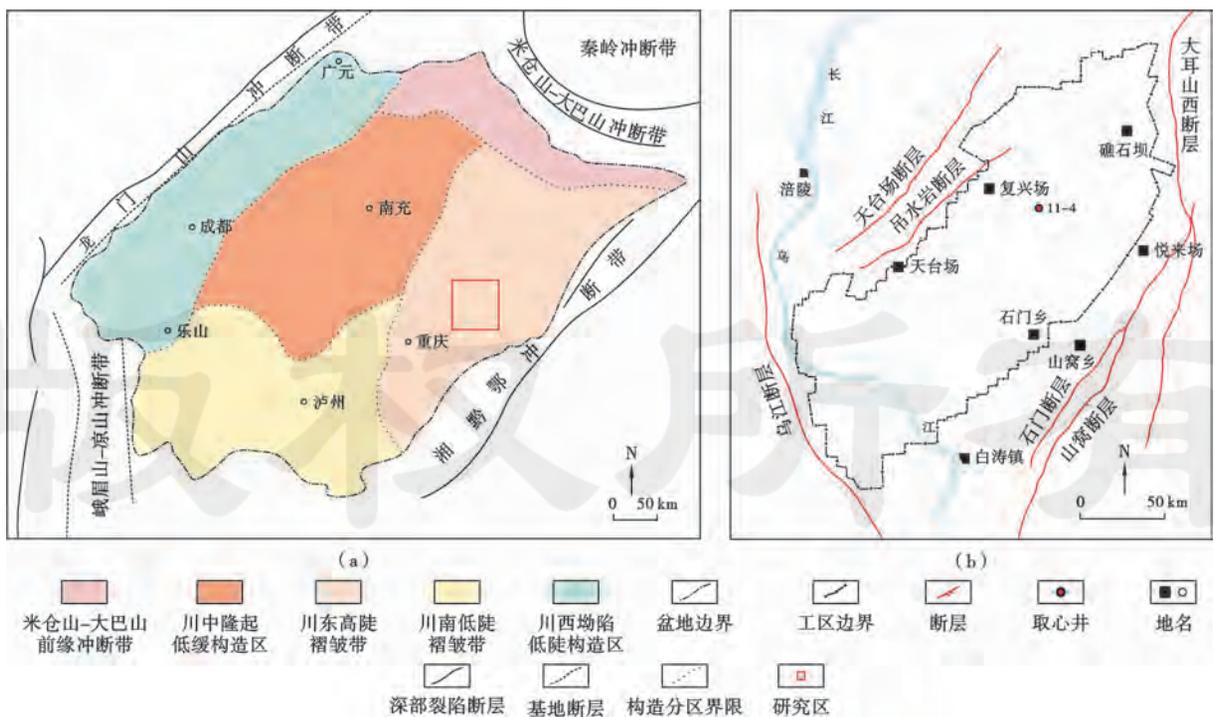


图1 四川盆地涪陵地区位置
Fig. 1 Location map of Fuling area in Sichuan Basin

向大耳山西、石门、吊水岩、天台场等断层及 NW 向乌江断层^[20-21] [图 1(b)]。自震旦纪以来,研究区受多期构造作用影响,具有早期沉降、晚期隆升的特点^[22],发育晚震旦世至三叠纪地层,研究层段上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组一段含气页岩段厚度介于 83~100 m,为深水陆棚沉积,平面展布稳定,且在五峰组及龙马溪组底部发育多层斑脱岩,单层厚度 0.1~2 cm 不等。

2 样品采集与处理

为开展斑脱岩及页岩储层发育特征研究,选取涪陵地区 11-4 井开展斑脱岩层精细岩心观察及系统采样。岩心采样自五峰组底界面至龙一段中部,按 25 cm 间距取样,共采集 170 余块样品,对所采样品分别采用薄片镜下鉴定、全岩/黏土 X 射线衍射、总有机碳含量、核磁孔隙结构分析、常量/微量元素等测试分析,对页岩样品的岩矿特征、有机碳含量、储层物性/含气性及斑脱岩层地球化学特征进行了系统测试分析。

3 斑脱岩发育特征

3.1 岩心观察特征

相较于野外露头中斑脱岩层受风化作用的影响,取心资料可提供更为清晰和系统的斑脱岩层发育特征信息。斑脱岩层在 11-4 井岩心中多呈深灰色或浅灰色,夹于黑色硅质页岩和碳质页岩中呈薄层产出,单层厚度为 0.1~2 cm 不等,偶见方解石脉充填,在五峰组—龙一段共识别出 42 层斑脱岩。

斑脱岩层垂向发育具有显著的分段性特征,根据斑脱岩单层厚度及层间厚度,将五峰组—龙马溪组一段斑脱岩发育层段划分为密集发育段、较发育段和欠发育段 3 个阶段。密集发育段分布于五峰组中部,在 2 m 厚度(2 359.32~2 361.92 m)内可见 16 层斑脱岩发育,单层厚度均大于 0.5 cm,且层间厚度较小(小于 20 cm),50 cm 岩心柱中常发育 5~6 层斑脱岩(图 2、图 3)。

较发育段分布于五峰组上部和龙马溪组底部,其斑脱岩单层厚度多小于 0.5 cm,层间厚度较大(大于 20 cm),50 cm 岩心柱中仅可见 2~3 层斑脱岩,发育密度相对减弱。在 2 350.4~2 359.15 m 深度内发育有 20 层斑脱岩(图 2、图 3)。

向上过渡至龙马溪组一段中上部,偶见斑脱岩层发育,单层厚度多为 0.2~0.4 cm,且层间厚度较大(最大可达 930 cm),在多数 50 cm 岩心柱内未见发育或偶见 1 层,因此将该段划分为斑脱岩欠发育段(图 2、图 3)。

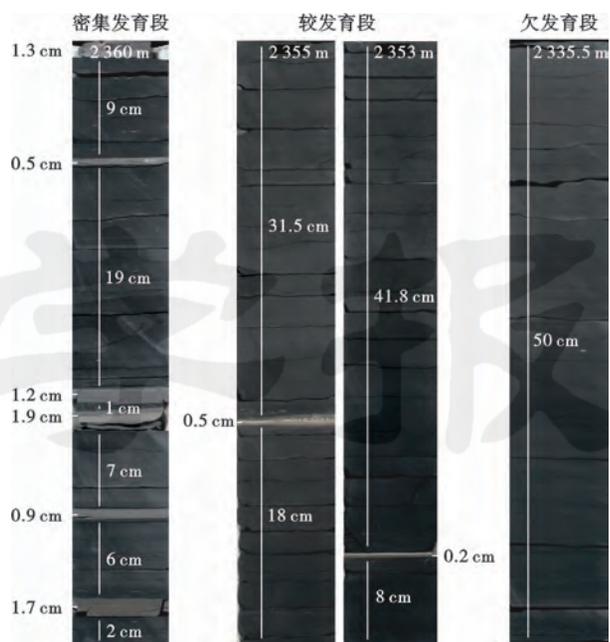


图 2 11-4 井斑脱岩分段发育模式

Fig. 2 Development mode pattern of bentonite in different sections of Well 11-4

3.2 岩石矿物学特征

对五峰组—龙马溪组一段斑脱岩样品进行全岩/黏土 X 射线衍射和薄片鉴定发现:斑脱岩主要由火山灰、晶屑组成,玻屑少见,且火山灰多发生硅化。晶屑成分为石英、长石、黑云母,呈棱角状和椭圆状,黑云母发生暗化。玻屑呈鸡骨状,多已脱玻化(图 4)。反映斑脱岩物质来源以火山灰为主,后期经历了较强的成岩作用改造,尤其是强烈的硅化作用,使原本软弱的岩层变得坚硬。

3.3 斑脱岩发育厚度及频次

斑脱岩单层发育厚度可间接反映火山喷发作用的持续时间,而斑脱岩层间厚度可作为火山喷发间隔的直接证据,反映火山喷发的活动频次。统计数据显示(图 5):自五峰组至龙马溪组一段,斑脱岩单层厚度呈持续减薄趋势,平均厚度由密集发育段的 1 cm 减薄至欠发育段的 0.34 cm,且具有较强的旋回性特征。密集发育段呈现 3 层斑脱岩为一旋回特征(厚—薄—薄),向上逐渐减薄,而较发育段呈现 4 层斑脱岩为一旋回特征(厚—薄—厚—薄),向上至欠发育段单层厚度稳定至 0.2~0.3 cm,整体反映火山喷发持续时间逐渐缩短。斑脱岩层间厚度是反映火山喷发间隔的重要指标,自五峰组至龙马溪组一段层间厚度呈显著增厚趋势,由密集发育段的平均 15.51 cm 增厚至欠发育段的 446.33 cm,整体反映出火山喷发的频率显著变小。

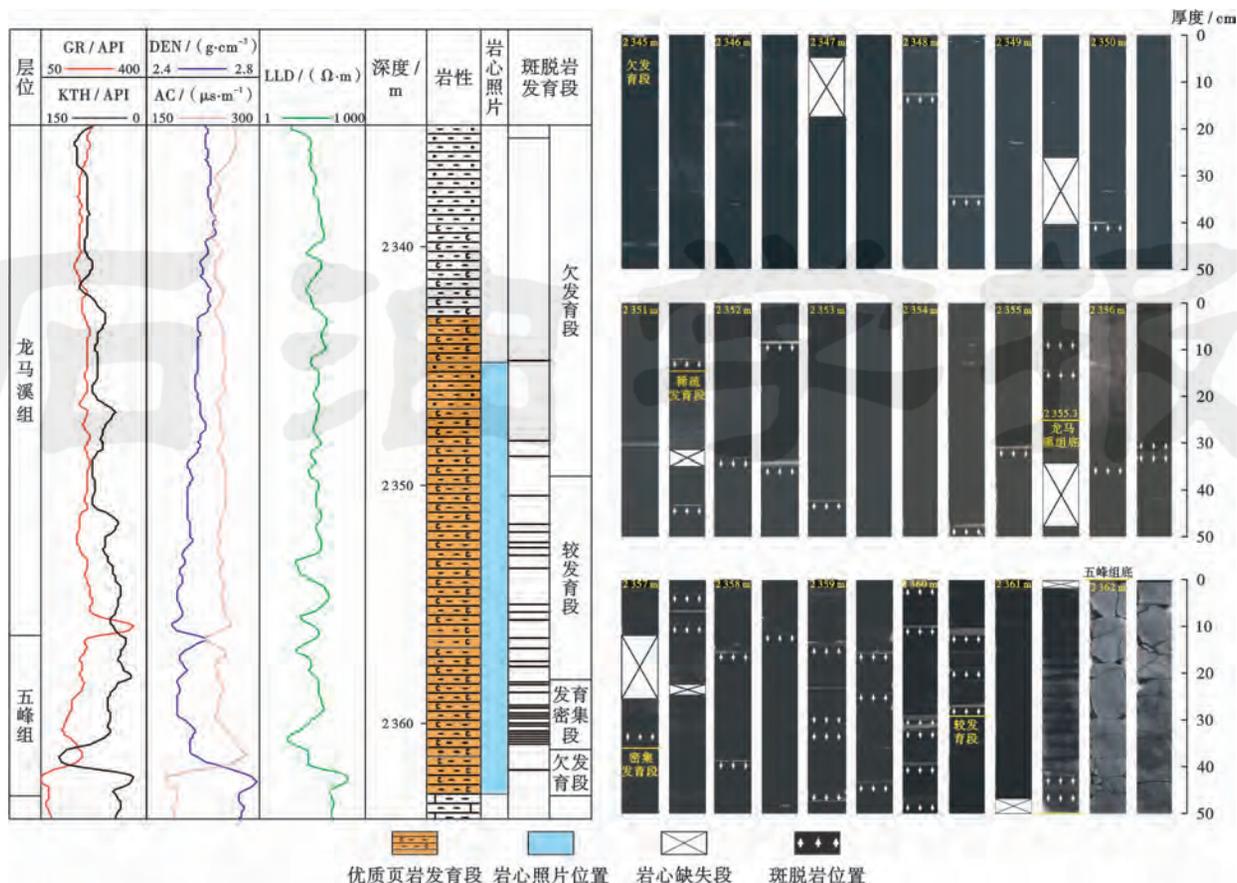


图3 11-4井斑脱岩垂向发育特征

Fig. 3 Vertical developmental characteristics of bentonite in Well 11-4

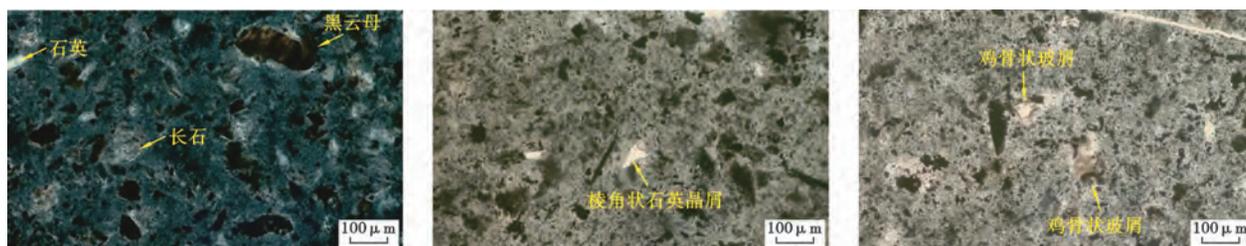


图4 野外斑脱岩镜下照片

Fig. 4 The on-site picture of bentonite under the microscope

4 斑脱岩发育段的页岩储层品质

4.1 岩性

四川盆地涪陵地区五峰组—龙马溪组一段海相页岩主要发育于深水陆棚环境,整体以黏土—粉砂级细粒沉积为主,含丰富的笔石和黄铁矿,水平纹层广泛发育,指示了静水、还原条件的深水沉积特征^[11]。自下至上,斑脱岩密集发育段以灰黑色富碳含黏土硅质页岩为主,镜下薄片可见大量放射虫等硅质骨骼类生物化石,扫描电镜可观察到自形晶体硅质,其自生硅质含量可占硅质总量的70%。斑脱岩较发育段和欠发育段以灰黑色富/高碳黏土质硅质页岩为主,薄片下可

观察到极细水平纹层[图6(a)],反映了沉积期水体静水、低能的沉积环境^[23-24]。

4.2 矿物组成

通过对涪陵地区五峰组—龙马溪组一段海相页岩斑脱岩发育段的33块样品进行全岩及黏土矿物X射线衍射实验分析可知,矿物成分主要为脆性矿物,其次为黏土矿物。脆性矿物主要包括石英、钾长石、斜长石、碳酸盐岩和黄铁矿,其中密集发育段含量介于66.5%~77.4%、平均为72.0%;较发育段含量为72.2%~84.4%、平均为78.1%;欠发育段含量为57%~80.4%、平均为69.5%。黏土矿物以伊/蒙混层和伊利石为主,其含量分别为22.6%~33.5%、15.6%~27.8%、

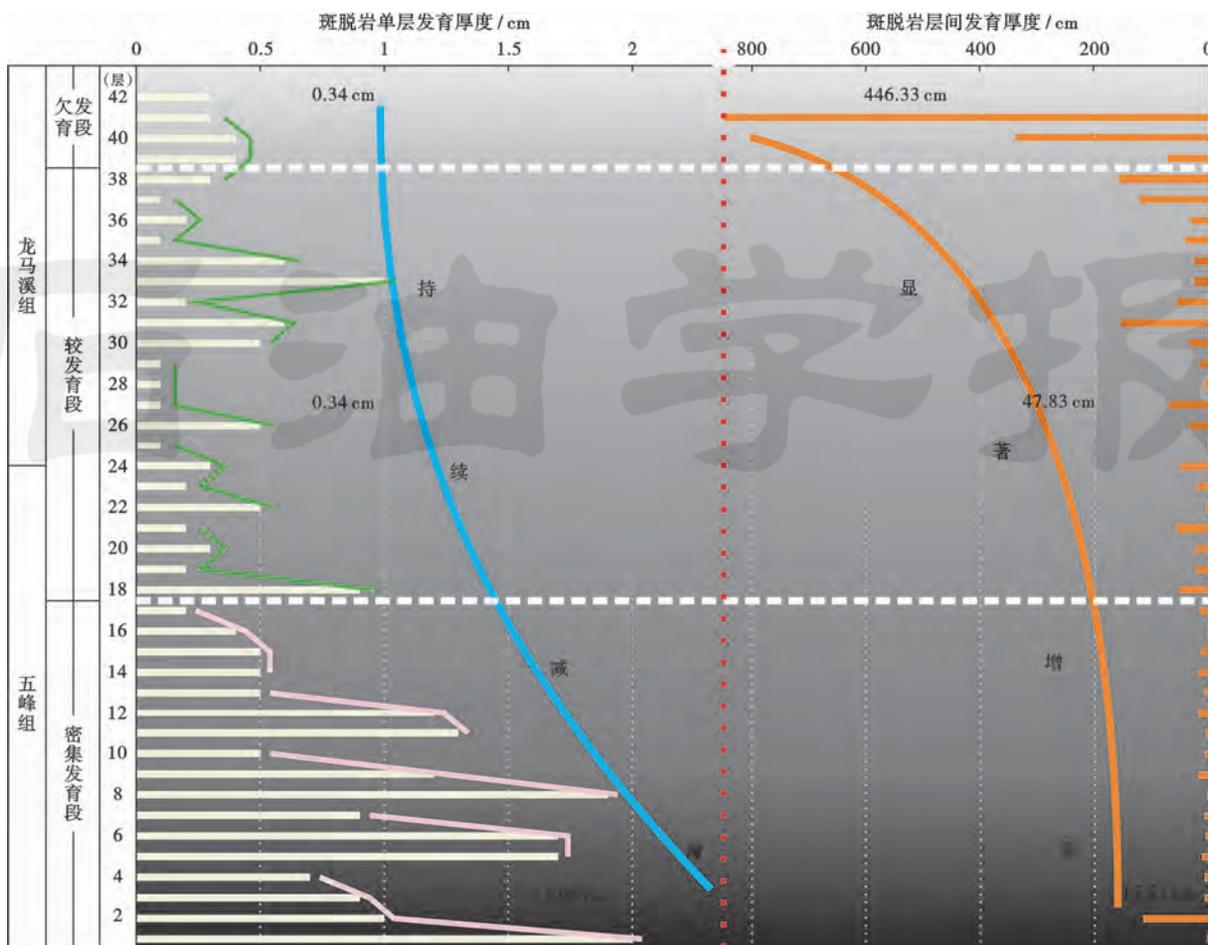


图 5 11-4 井斑脱岩层发育厚度及频次

Fig. 5 The thickness and frequency of bentonite layers in Well 11-4

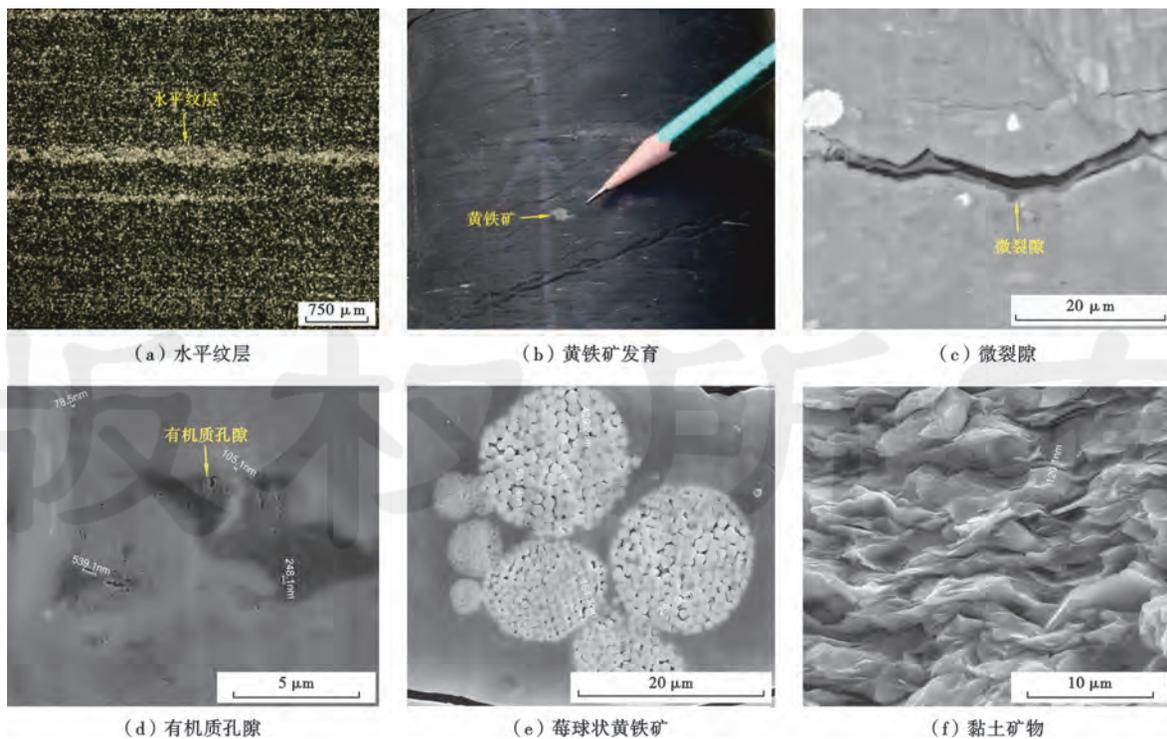


图 6 11-4 井斑脱岩层发育段页岩矿物及孔隙特征

Fig. 6 Mineral and pore characteristics of shale in bentonite layers, Well 11-4

19.6%~43%，平均含量依次为 35.8%、21.9% 和 30.5%。对比可知，较发育段具有高脆性矿物、低黏土矿物的特征，其中硅质含量平均为 65.5%，最高可达 76%。相对而言，密集发育段和欠发育段具有低脆性矿物和高黏土矿物特征。此外，在不同发育段均可见黄铁矿发育[图 6(b)]，主要呈星散状和条纹状，指示了沉积期水体整体呈还原性沉积环境。

4.3 有机碳含量

有机碳含量在不同类型的斑脱岩发育段具有较大差异。自下部密集发育段至上部欠发育段总体呈降低趋势，其有机碳含量平均值依次为 3.33%、3.99% 和 2.81%。纵向上，在五峰组底部欠发育段时期，斑脱岩层下部出现 TOC 含量高值，随后降低，密集发育段沉积期，TOC 含量呈显著升高趋势，并在较发育段下部斑脱岩发育频次相对较低的层段达到峰值(5.65%)，向上呈现降低趋势，欠发育段 TOC 含量整体较低，含量介于 2.13%~3.4%。总体可见有机质在斑脱岩较发育段最为富集，而密集发育段和欠发育段其 TOC 含量相对有所下降。

4.4 储层物性

页岩中广泛发育的大量有机质孔隙、无机孔隙和微裂缝构成了页岩气赋存的主要场所^[25-31]。基于氩离子抛光扫描电镜和有机超显微组分等页岩微观结构测试分析技术，对五峰组—龙马溪组一段斑脱岩发育段的页岩孔隙特征研究表明：页岩储集空间主要由微孔隙和微裂隙[图 6(c)]组成，其中微孔隙进一步可分为有机质孔隙、无机孔隙(黏土孔隙、碎屑孔隙)。

有机质孔隙是斑脱岩密集发育段和较发育段的主要孔隙类型，分别占总孔隙体积的 63.7% 和 66.4% (表 1)。有机质孔隙主要为有机质热解演化过程中在有机质内部所生成的孔隙。氩离子抛光扫描电镜揭示[图 6(d)]，孔隙平面呈圆形、椭圆形及不规则形状，有

机质孔隙孔径变化范围较大，从纳米级到微米级，主要集中在纳米级，面孔率一般介于 10%~50%，平均面孔率为 30%。无机孔隙则成为斑脱岩欠发育段的主要孔隙发育类型，占总孔隙体积的 51.8%，并以黏土孔隙为主，碎屑孔隙相对欠发育[图 6(e)、图 6(f)]。黏土孔隙主要是在成岩演化过程中矿物晶体体积缩小而在晶体间生成的晶间孔，孔隙体积较大。

不同类型孔隙对页岩气赋存状态具有重要影响。有机质孔隙分布于有机质内既是生排烃过程中形成的有效页岩赋存空间，同时也是页岩储层有效连通的重要通道，是页岩最为重要的孔隙类型。统计数据揭示：虽然斑脱岩不同类型发育段孔隙度基本一致(平均值为 4.53%)，但密集发育段和较发育段其有机质孔隙占比均大于 60%，显著高于欠发育段(48.2%)，其页岩气赋存条件明显优于欠发育段。

表 1 11-4 井斑脱岩发育段孔隙度及孔隙类型比例
Table 1 The porosity and pore-type proportion of bentonite layers in Well 11-4

斑脱岩发育段	有机质孔隙比例/%	无机孔隙比例/%		孔隙度/%
		黏土孔隙	碎屑孔隙	
欠发育段	48.2	37.4	14.4	4.46
较发育段	66.4	29.2	4.4	4.56
密集发育段	63.7	29.8	6.5	4.57

4.5 储层含气性

页岩气主要以吸附态和游离态赋存于页岩中，其中吸附气主要吸附于有机质和黏土矿物表面，而游离气主要聚集于孔隙与微裂缝中^[32-33]。在对 11-4 井岩心进行现场含气量测试分析显示(图 7、图 8)，密集发育段含气量平均为 6.40 m³/t，上部较发育段整体呈现逐渐上升趋势，含气量介于 4.15~7.71 m³/t，平均值为 6.57 m³/t，略高于密集发育段，而欠发育段总含气量最低，含气量平均值为 5.06 m³/t。

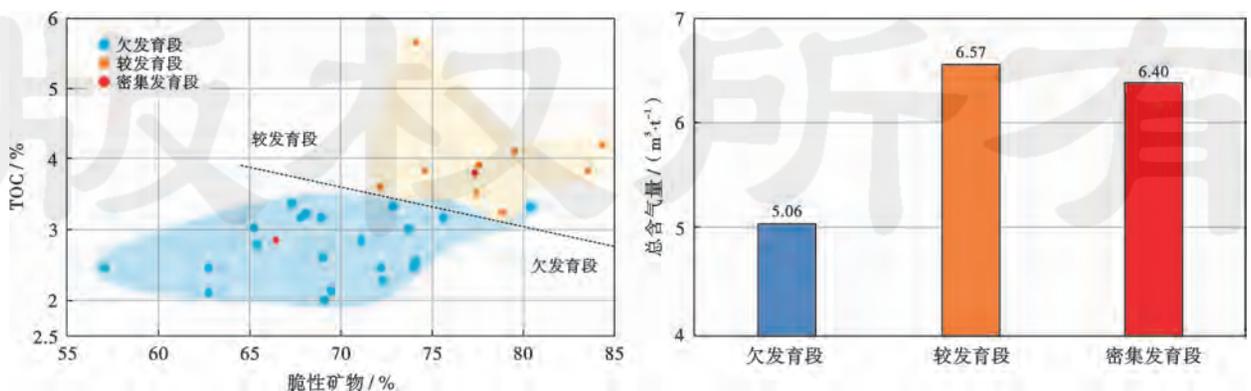


图 7 11-4 井斑脱岩发育段储层品质

Fig. 7 Reservoir quality of bentonite layers in Well 11-4

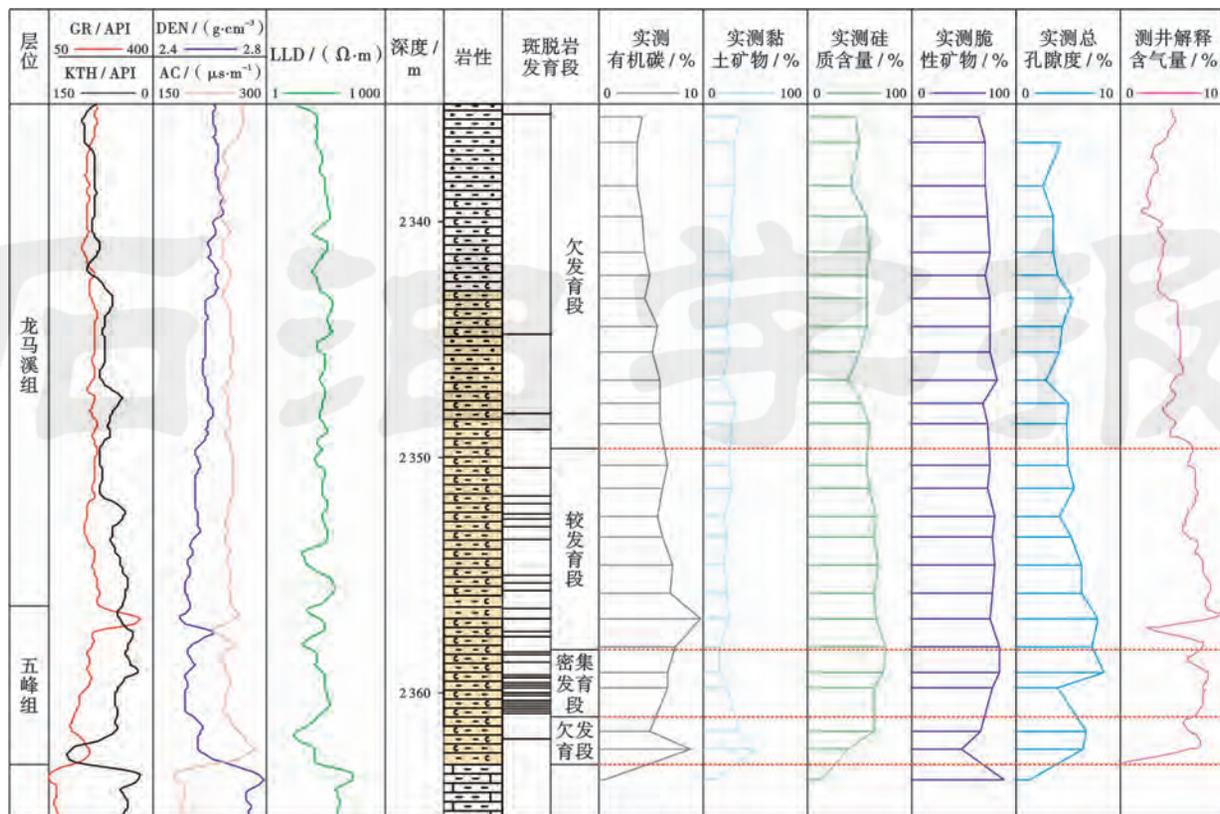


图 8 11-4 井储层品质综合柱状图

Fig. 8 Reservoir quality profiles in Well 11-4

5 斑脱岩发育的页岩气地质意义

斑脱岩层作为特殊地质事件——火山喷发的沉积记录,反映了古构造—沉积背景的变化特征,借助地球化学手段反演火山喷发造成的古海洋沉积环境参数变化(古生产力、氧化还原环境)^[16,34],可揭示火山喷发对页岩储层品质的影响机理。

5.1 氧化还原环境

火山爆发时喷出的大量火山灰和火山气体可遮蔽阳光,导致大气环境的剧烈变化,进一步影响了古海洋的生产力和氧化还原环境的变化,从而对页岩沉积产生重要影响。沉积岩中的微量元素和特殊矿物作为重建古氧化还原环境的重要参数被广泛应用。本文采用 U/Th 参数来反演五峰组—龙马溪组沉积期古海洋氧化还原环境,其数值大于 1.25 指示缺氧环境,1.25~0.75 表示贫氧环境,而小于 0.75 反映富氧环境^[13,35]。

11-4 井 13 块样品微量元素测试分析揭示:自五峰组底部斑脱岩欠发育段至密集发育段早期,U/Th 分别为 0.12 和 0.31,反映火山活动频次较低,整体环境为富氧环境。密集发育段时期,U/Th 急剧增高至 2.22,表明短时间内火山活动的频繁喷发,导致沉积环境发生剧烈变化,由早期富氧环境突变为缺氧环境,而

至较发育段底部,缺氧环境达到峰值,U/Th 含量为 4.20,随着火山活动频次逐步减弱,斑脱岩较发育段中上部沉积环境逐渐由缺氧环境(U/Th = 1.58)过渡至贫氧环境(U/Th = 1.17)。伴随火山活动频次的进一步减弱,斑脱岩欠发育段 U/Th 平均值 0.61,沉积环境逐渐由贫氧环境演变为富氧环境。

上述分析表明:五峰组底部以富氧环境为主,伴随火山喷发频次逐渐升高,五峰组中部密集发育段至龙马溪组一段较发育段,沉积环境演变为贫氧—缺氧环境,而随火山喷发强度减弱,至欠发育段沉积环境逐渐过渡为富氧环境。斑脱岩层段指示的火山活动持续周期和发育频次同沉积期氧化还原环境有良好的一致性,揭示出间发性的火山喷发活动是导致五峰组—龙马溪组一段沉积期氧化还原环境变化的重要原因之一。

5.2 古海洋生产力

古海洋生产力作为重要参数可揭示页岩储层有机质富集和储集空间发育机理。总有机碳含量、Biogenic Ni、Biogenic Cu、Biogenic Mo 等元素可用以重建古海洋生产力,且已被广泛应用^[13,36-38]。

11-4 井 38 块样品进行总有机碳含量和主量/微量元素测试分析数据揭示:五峰组底部欠发育段 TOC 含量增加由 0.27 增至 5.11 后骤降至 2.86,TOC 含量

的降低对应于五峰组底部第1套斑脱岩层发育,反映火山活动喷出的气体和火山灰遮蔽阳光,导致气温降低,出现了初期生产力降低。密集发育段时期,TOC含量、Ni和Mo含量均呈增加趋势,而Cu和Ba含量呈降低,表明火山喷发在改变沉积环境(富氧—缺氧)同时,新鲜的火山(灰)物质经水解作用提供了Fe、 P_2O_5 等生物营养物质,有利于古生物发育,但火山活动过于频繁总体抑制了古生物发育和有机质富集。而龙

马溪组底部较发育段,火山活动频次相对减弱,且TOC含量和Ni含量达到峰值,揭示适当的火山喷发有利于富营养海盆的形成并显著提高了古海洋生产力(图9)。

古海洋生产力变化直接对应于海相页岩有机碳含量变化,可反映出页岩有机质富集程度,而鉴于五峰组—龙一段密集发育段和较发育段页岩储集空间以有机孔为主,所以有机质的富集也显著提高了页岩储集能力。

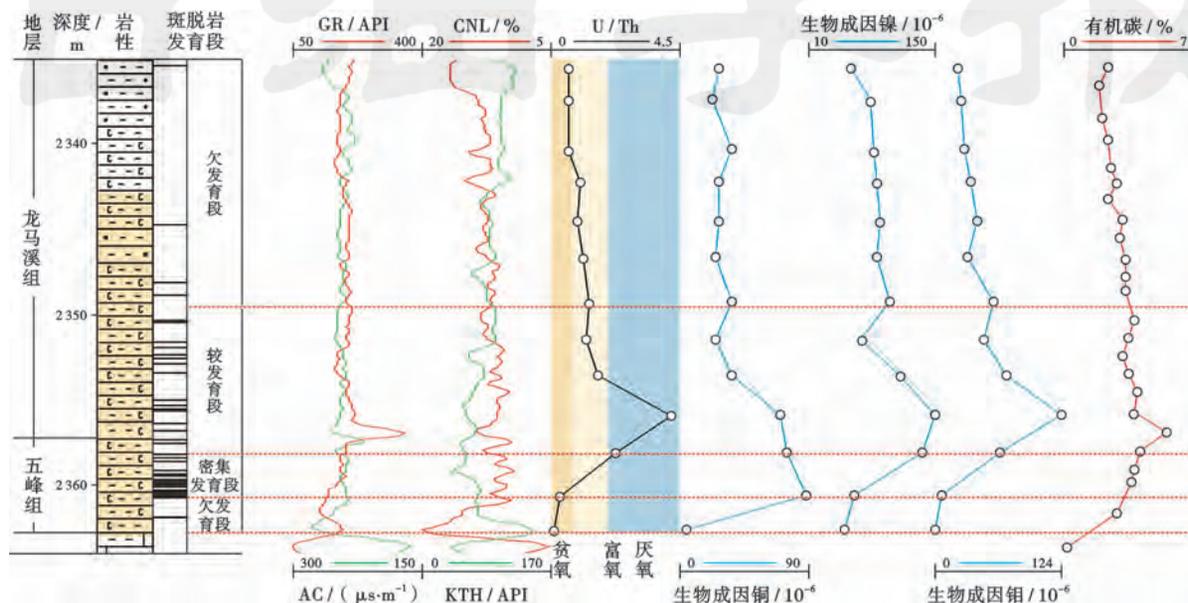


图9 11-4井古生产力示意图

Fig. 9 Paleoproductivity of Well 11-4

6 火山活动与储层质量

斑脱岩层的发育同海相页岩储层品质存在较为紧密的联系。斑脱岩较发育段代表的适度火山活动事件对五峰组—龙一段海相页岩富碳、高硅、高有机孔和高含气性的储层特征具有重要积极影响,而密集发育段代表的高频率火山活动事件和欠发育段代表的低频率火山活动事件对该段页岩储层品质的积极影响相对减弱。

受构造运动影响,在晚奥陶世—早志留世火山活动频次和强度逐渐增加,在上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组一段地层中发育有多层斑脱岩。火山喷发引起气候环境的剧烈变化,火山活动喷出的气体中含有大量 CO_2 、氮、氮的氧化物和硫的氧化物等,加速了碳、氮循环,满足了生物勃发的需要,此外新鲜的火山(灰)物质经水解作用提供了Fe、 P_2O_5 等生物营养物质,有利于富营养海盆的形成^[17]。受周缘火山活动及沉积期较为封闭的滞留盆地沉积环境影响,海水中富含硅质和各种营养物质,利于各类浮游类生物和硅质骨骼类生物(放射虫、海绵骨针)大量发育。加之适度的火山活动造成

沉积环境演化为缺氧环境和火山喷发沉积形成的斑脱岩层具有较强的隔氧能力,使得在五峰组—龙一段中下部形成了有机质和硅质含量均富集的“双高”特征。有机质富集既有助于页岩生烃能力提高,又有效增加了有机质孔隙发育,硅质含量的增加使得页岩可压性提高,有利于形成压裂改造复杂缝网。

对于斑脱岩密集发育段所代表的高频率火山喷发阶段,会形成极度缺氧环境,并伴随温度急剧升高,致使古生物发育规模有限,古海洋生产力较低,不利于有机质富集;相反,斑脱岩欠发育段所代表的低频率火山喷发阶段,没有为生物繁盛发育提供足够的营养物质,同样不利于硅质骨骼类生物发育和有机质富集,致使页岩储层品质较差。

7 结论

(1) 通过对岩心的精细描述,识别出四川盆地涪陵地区上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组一段发育42层斑脱岩,结合斑脱岩层的单层厚度和层间厚度,将含斑脱岩地层划分为密集发育段、较发育段和欠发

育段三类。

(2) 借助氦离子抛光扫描电镜、全岩/黏土 X 射线衍射分析、有机碳测试等技术方法,对比了不同斑脱岩发育段页岩储层品质差异性特征:相较于密集发育段和欠发育段,较发育段具有高脆性矿物、高有机碳含量和高含气性的“三高”特征,为海相页岩储层品质最优发育段。

(3) 从火山喷发作用导致的古氧化还原环境和古海洋生产力两方面揭示了不同斑脱岩发育段储层品质差异性成因机理。间发性的火山喷发活动是导致上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组一段沉积期氧化还原环境变化的根本原因。火山喷发活动一方面导致沉积环境突变为缺氧环境,致使生物灭绝,利于有机质保存;另一方面,火山喷发出的火山物质利于形成富营养性海盆,促进生物发育,显著提高古海洋生产力。此外,适度频率的火山活动事件(斑脱岩较发育段)对形成富碳、高硅的优质海相页岩具有积极影响,过高频率和过低频率的火山活动事件对于优质页岩储层品质的发育影响性有限。

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] CLARKSON C R, SOLANO N, BUSTIN R M, et al. Pore structure characterization of North American shale gas reservoirs using USANS/SANS, gas adsorption, and mercury intrusion[J]. *Fuel*, 2013, 103: 606-616.
- [3] 张东晓, 杨婷云. 页岩气开发综述[J]. *石油学报*, 2013, 34(4): 792-801.
ZHANG Xiaodong, YANG Yunting. An overview of shale-gas production[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(4): 792-801.
- [4] 董大忠, 邹才能, 杨桦, 等. 中国页岩气勘探开发进展与发展前景[J]. *石油学报*, 2012, 33(S1): 107-114.
DONG Dazhong, ZOU Caineng, YANG Hua, et al. Progress and prospects of shale gas exploration and development in China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(S1): 107-114.
- [5] 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.
WANG Zhigang. Breakthrough of Fuling shale gas exploration and development and its inspiration[J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(1): 1-6.
- [6] 朱逸青, 王兴志, 冯明友, 等. 川东地区下古生界五峰组-龙马溪组页岩岩相划分及其与储层关系[J]. *岩性油气藏*, 2016, 28(5): 59-66.
ZHU Yiqing, WANG Xingzhi, FENG Mingyou, et al. Lithofacies classification and its relationship with reservoir of the Lower Paleozoic Wufeng-Longmaxi Formation in the eastern Sichuan Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2016, 28(5): 59-66.
- [7] 梁超, 姜在兴, 杨懿婷, 等. 四川盆地五峰组-龙马溪组页岩岩相及储集空间特征[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(6): 691-698.
LIANG Chao, JIANG Zaixing, YANG Yiting, et al. The characteristics of shale lithofacies and reservoir space of the Wufeng-Longmaxi Formation, Sichuan Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(6): 691-698.
- [8] CHEN L, LU Y C, JIANG S, et al. Heterogeneity of the Lower Silurian Longmaxi marine shale in the southeast Sichuan Basin of China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 65: 232-246.
- [9] TANG S, ZHANG J, ELSWORTH D, et al. Lithofacies and pore characterization of the Lower Permian Shanxi and Taiyuan shales in the southern North China Basin[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 36: 644-661.
- [10] 冉波, 刘树根, 孙玮, 等. 四川盆地及周缘下古生界五峰组-龙马溪组页岩岩相分类[J]. *地学前缘*, 2016, 23(2): 96-107.
RAN Bo, LIU Shugen, SUN Wei, et al. Lithofacies classification of shales of the Lower Paleozoic Wufeng-Longmaxi Formations in the Sichuan Basin and its surrounding areas, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(2): 96-107.
- [11] 赵建华, 金之钧, 金振奎, 等. 四川盆地五峰组-龙马溪组页岩岩相类型与沉积环境[J]. *石油学报*, 2016, 37(5): 572-586.
ZHAO Jianhua, JIN Zhijun, JIN Zhenkui, et al. Lithofacies types and sedimentary environment of shale in Wufeng-Longmaxi Formation, Sichuan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(5): 572-586.
- [12] HICKEY J J, HENK B. Lithofacies summary of the Mississippian Barnett Shale, Mitchell 2 T. P. Sims well, Wise County, Texas[J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91(4): 437-443.
- [13] LIU Z H, ALGEO T J, GUO X S, et al. Paleo-environmental cyclicity in the Early Silurian Yangtze Sea (South China): Tectonic or glacio-eustatic control? [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2017, 466: 59-76.
- [14] 王志峰, 张元福, 梁雪莉, 等. 四川盆地五峰组-龙马溪组不同水动力成因页岩岩相特征[J]. *石油学报*, 2014, 35(4): 623-632.
WANG Zhifeng, ZHANG Yuanfu, LIANG Xueli, et al. Characteristics of shale lithofacies formed under different hydrodynamic conditions in the Wufeng-Longmaxi Formation, Sichuan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2014, 35(4): 623-632.
- [15] 王玉满, 王淑芳, 董大忠, 等. 川南下志留统龙马溪组页岩岩相表征[J]. *地学前缘*, 2016, 23(1): 119-133.
WANG Yuman, WANG Shufang, DONG Dazhong, et al. Lithofacies characterization of Longmaxi Formation of the Lower Silurian, southern Sichuan[J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(1): 119-133.
- [16] LI Y F, ZHANG T W, ELLIS G S, et al. Depositional environment and organic matter accumulation of Upper Ordovician-Lower Silurian marine shale in the Upper Yangtze Platform, South China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2017, 466: 252-264.
- [17] MA Y Q, FAN M J, LU Y C, et al. Geochemistry and sedimentology of the Lower Silurian Longmaxi mudstone in southwestern China: Implications for depositional controls on organic matter accumulation[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 75: 291-309.
- [18] 苏文博, 何龙清, 王永标, 等. 华南奥陶-志留系五峰组及龙马溪组底部斑脱岩与高分辨综合地层[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2002, 32(3): 207-219.
SU Wenbo, HE Longqing, WANG Yongbiao, et al. K-bentonite beds and high-resolution integrated stratigraphy of the upper-

- most Ordovician Wufeng and the lowest Silurian Longmaxi formations in South China[J]. Chinese Science Series D: Earth Science, 2003, 46(11): 1121-1133.
- [19] 胡艳华, 刘健, 周明忠, 等. 奥陶纪和志留纪钾质斑脱岩研究评述[J]. 地球化学, 2009, 38(4): 393-404.
HU Yanhua, LIU Jian, ZHOU Mingzhong, et al. An overview of Ordovician and Silurian K-bentonites[J]. Geochimica, 2009, 38(4): 393-404.
- [20] 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.
GUO Tonglou, LIU Ruobing. Implications from marine shale gas exploration breakthrough in complicated structural area at high thermal stage: taking Longmaxi formation in Well JY1 as an example[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(4): 643-651.
- [21] 郭旭升, 李宇平, 刘若冰, 等. 四川盆地焦石坝地区龙马溪组页岩微观孔隙结构特征及其控制因素[J]. 天然气工业, 2014, 34(6): 9-16.
GUO Xusheng, LI Yuping, LIU Ruobing, et al. Characteristics and controlling factors of micro-pore structures of Longmaxi Shale Play in the Jiaoshiba area, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(6): 9-16.
- [22] 张士万, 孟志勇, 郭战峰, 等. 涪陵地区龙马溪组页岩储层特征及其发育主控因素[J]. 天然气工业, 2014, 34(12): 16-24.
ZHANG Shiwan, MENG Zhiyong, GUO Zhanfeng, et al. Characteristics and major controlling factors of shale reservoirs in the Longmaxi Fm, Fuling area, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(12): 16-24.
- [23] 杨潇, 姜呈馥, 孙兵华, 等. 砂质纹层的发育特征及对页岩储层物性的影响——以鄂尔多斯盆地南部中生界延长组为例[J]. 延安大学学报: 自然科学版, 2015, 34(2): 18-23.
YANG Xiao, JIANG Chengfu, SUN Binghua, et al. Al. The sandy laminar characteristics and its effect on reservoir property of shale: a case study from the upper Triassic Yanchang Fm in Southern Ordos Basin[J]. Journal of Yan'an University: Natural Science Edition, 2015, 34(2): 18-23.
- [24] 王冠民, 钟建华. 湖泊纹层的沉积机理研究评述与展望[J]. 岩石矿物学杂志, 2004, 23(1): 43-48.
WANG Guanmin, ZHONG Jianhua. A review and the prospects of the researches on sedimentary mechanism of lacustrine laminae[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2004, 23(1): 43-48.
- [25] 钟太贤. 中国南海海相页岩孔隙结构特征[J]. 天然气工业, 2012, 32(9): 1-4.
ZHONG Taixian. Characteristics of pore structure of marine shales in South China[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(9): 1-4.
- [26] HAO F, ZOU H Y. Cause of shale gas geochemical anomalies and mechanisms for gas enrichment and depletion in high-maturity shales[J]. Marine and Petroleum Geology, 2013, 44: 1-12.
- [27] SUN M D, YU B S, HU Q H, et al. Pore characteristics of Longmaxi shale gas reservoir in the Northwest of Guizhou, China: Investigations using small-angle neutron scattering (SANS), helium pycnometry, and gas sorption isotherm [J]. International Journal of Coal Geology, 2017, 171: 61-68.
- [28] TANG X L, JIANG Z X, JIANG S, et al. Heterogeneous nanoporosity of the Silurian Longmaxi Formation shale gas reservoir in the Sichuan Basin using the QEMSCAN, FIB-SEM, and nano-CT methods[J]. Marine and Petroleum Geology, 2016, 78: 99-109.
- [29] 王同, 杨克明, 熊亮, 等. 川南地区五峰组—龙马溪组页岩层序地层及其对储层的控制[J]. 石油学报, 2015(08): 915-925.
WANG Tong, YANG Keming, XIONG Liang, et al. Shale sequence stratigraphy of Wufeng-Longmaxi Formation in southern Sichuan and their control on reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015(08): 915-925.
- [30] 牛露, 朱如凯, 王莉森, 等. 华北地区北部中—上元古界泥页岩储层特征及页岩气资源潜力[J]. 石油学报, 2015(06): 664-672.
LIU Lu, ZHU Rukai, WANG Lisen, et al. Characteristics of Mesozoic-Mesozoic mud shale reservoirs and shale gas resource potential in northern North China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015(06): 664-672.
- [31] 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(08): 926-939.
ZHANG Xiaoming, SHI Wangzhong, XU Qinghai, et al. Characteristics and controlling factors of shale gas reservoirs in Jiaquan dam area, Sichuan Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015(08): 926-939.
- [32] 邱小松, 杨波, 胡明毅. 中扬子地区五峰组—龙马溪组页岩气储层及含气性特征[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(6): 1274-1283.
QIU Xiaosong, YANG Bo, HU Mingyi. Characteristics of shale reservoirs and gas content of Wufeng-Longmaxi formation in the middle Yangtze Region[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(6): 1274-1283.
- [33] 薛冰, 张金川, 等. 黔西北龙马溪组页岩微观孔隙结构及储气特征[J]. 石油学报, 2015, 36(2): 138-149, 173.
XUE Bing, ZHANG Jinchuan, et al. Characteristics of microscopic pore and gas accumulation on shale in Longmaxi Formation, northwest Guizhou[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(2): 138-149, 173.
- [34] ROSS D J K, BUSTIN R M. Investigating the use of sedimentary geochemical proxies for paleoenvironment interpretation of thermally mature organic-rich strata: Examples from the Devonian-Mississippian shales, Western Canadian Sedimentary Basin[J]. Chemical Geology, 2009, 260(1/2): 1-19.
- [35] YAN D T, WANG H, FU Q L, et al. Geochemical characteristics in the Longmaxi Formation (Early Silurian) of South China: Implications for organic matter accumulation[J]. Marine and Petroleum Geology, 2015, 65: 290-301.
- [36] 沈俊, 施张燕, 冯庆来. 古海洋生产力地球化学指标的研究[J]. 地质科技情报, 2011, 30(2): 69-77.
SHEN Jun, SHI Zhangyan, FENG Qinglai. Review on geochemical proxies in paleo-productivity studies [J]. Geological Science and Technology Information, 2011, 30(2): 69-77.
- [37] 黄永建, 王成善, 汪云亮. 古海洋生产力指标研究进展[J]. 地学前缘, 2005, 12(2): 163-170.
HUANG Yongjian, WANG Chengshan, WANG Yunliang. Research progress of ancient marine productivity index [J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(2): 163-170.
- [38] 李艳芳, 邵德勇, 吕海刚, 等. 四川盆地五峰组—龙马溪组海相页岩元素地球化学特征与有机质富集的关系[J]. 石油学报, 2015(12): 1470-1483.
LI Yanfang, SHAO Deyong, LYU Haigang, et al. Relationship between geochemical characteristics of marine shale elements and enrichment of organic matter in Wufeng Formation-Longmaxi Formation, Sichuan Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015(12): 1470-1483.