

DOI:10.13745/j.esf.yx.2017-5-5

中上扬子地区五峰组—龙马溪组硅质页岩的生物成因证据及其与页岩气富集的关系

卢龙飞, 秦建中, 申宝剑, 腾格尔, 刘伟新, 张庆珍

1. 中国石化油气成藏重点实验室, 江苏 无锡 214151
2. 中国石化石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214151

LU Longfei, QIN Jianzhong, SHEN Baojian, Tenger, LIU Weixin, ZHANG Qingzhen

1. SINOPEC Key Laboratory of Hydrocarbon Accumulation, Wuxi 214151, China
2. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, Research Institute of Petroleum Exploration and Production, SINOPEC, Wuxi 214151, China

LU Longfei, QIN Jianzhong, SHEN Baojian, et al. The origin of biogenic silica in siliceous shale from Wufeng–Longmaxi Formation in the Middle and Upper Yangtze region and its relationship with shale gas enrichment. *Earth Science Frontiers*, 2018, 25(4): 226-236

Abstract: In order to study the origin of organic matter enriched siliceous shale from Wufeng – Longmaxi Formation in the Middle and Upper Yangtze region, and its relationship with shale gas accumulation, rock features, mineral composition, micromorphology, structural characteristics and chemical elements were analyzed by X-ray diffraction, scanning electron microscope (SEM) and energy disperse spectroscopy methods. Quartz content was found to be relatively high, mostly above 45% and 88% being the highest, while clay mineral content was relatively low in the Wufeng Formation and lower section of the Longmaxi Formation. Abundant biological residue and debris can be seen in the siliceous shales under SEM, they acted as skeleton particles and bound tightly with the mineral matrix, resulting in a highly compact rock structure; clay mineral enriched shales, whereas, developed horizontal beddings. Under SEM, the observed circular layered growth structure and needle structures of the biogenic materials clearly showed the characteristics of radiolarian morphology. The chemical compositions of these structures were shown to be mainly consisted of silicon and oxygen elements by energy spectrum analysis, further providing proofs to their radiolarian origin. Moreover, surface distribution of elements indicated the terrigenous input and hydrothermal activity were very limited, implying silica was mainly from radiolarian skeleton. Altogether we now have sufficient evidence to support a biogenic origin for siliceous shales in the region. High soluble silica concentration is prerequisite for radiolarian enrichment, it creates an environment for algae proliferation which leads to organic matter accumulation. Biogenic silicon was also favorable for the preservation of primary inorganic and secondary organic pores. Enrichment of biogenic silica, therefore, plays an important role in shale gas accumulation in the Wufeng and Longmaxi Formations.

Key words: biogenic; silica; quartz; radiolarian; siliceous shale

摘要: 利用 X 射线衍射和扫描电子显微镜及能谱仪开展了岩石特征、矿物组成、微观结构特征和元素与矿物成分分析, 研究了中上扬子地区五峰组—龙马溪组下段富有机质硅质页岩的成因及其与页岩气富集的关系。五峰组和龙马溪组下段硅质页岩中的脆性矿物石英含量较高, 多在 45% 以上, 最高达 88%, 而黏土矿物含量较低; 少数页岩样品黏土矿物含量较高, 同时碳酸盐矿物含量也较高, 石英含量则较低。显微镜下发现富

收稿日期: 2017-01-05; 修回日期: 2017-04-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1562106); 国家油气重大专项(2016ZX05036002); 中石化技术开发项目(P15097)

作者简介: 卢龙飞(1977—), 男, 博士, 主要从事油气地球化学和非常规油气地质研究。E-mail: lulf.syky@sinopec.com

含石英的硅质页岩中大多存在大量团块状生物碎屑,并作为骨架颗粒与其他矿物基质胶结在一起,结构致密,而富含黏土矿物的页岩则多具水平层理和纹层理,未见生物碎屑。进一步的显微分析发现,富含石英的硅质页岩中的生物碎屑具有清晰的外形轮廓和圈层状生长结构及放射状针刺结构,显示出明显的硅质生物放射虫的形貌特征,且主要由硅和氧两种元素组成的能谱分析结果证实了确属放射虫。多种元素的面分布特征进一步反映出陆源物质的输入较少,而且海底的热液活动也极为有限的特征,指示页岩中硅质主要来源于放射虫生物骨架,为该段硅质页岩的生物成因提供了充分证据。放射虫大量发育的基本条件是海水中营养元素-溶解态硅富集,浮游藻类在该环境下易于大量勃发,高的初级生产力条件为硅质页岩中有机质的富集奠定了重要物质基础。放射虫成因的硅质页岩还有利于页岩中原生无机孔隙和次生有机孔隙的保持和保存,对页岩气的富集有极为重要的控制作用。

关键词:生物成因;硅;石英;放射虫;硅质页岩

中图分类号:P618.13;P588.244;P581 文献标志码:A 文章编号:1005-2321(2018)04-0226-11

0 引言

在传统油气地质理论中,由于将富有机质的泥页岩仅当作常规油气的烃源岩对待,针对它们开展较多的主要是烃源岩地球化学方面的研究工作^[1-5]。随着近几年来页岩油气地质理论的发展,人们逐渐认识到富有机质页岩作为非常规油气储层的巨大潜力,烃源岩层系尤其是页岩本身潜在的资源评价与勘探已成为当前油气勘探领域的热点^[6-8]。在工作中开始重视页岩的结构、组成、成岩变化、储层精细刻画和气体赋存形式及原始含气量变化等多方面的研究^[9-17],相关成果的取得使人们对页岩的研究认识水平达到了一个新的高度。

我国南方扬子地区普遍发育多套海相黑色页岩层系,特别是奥陶-志留系五峰组-龙马溪组因该层位页岩气勘探的突破和成功开发而受到广泛关注。国内学者针对这一层位已经开展了大量的矿物组成、微观孔隙类型与结构、连通性和页岩气含量等相关研究,取得了较多成果^[18-22]。五峰组-龙马溪组下段黑色页岩以高有机质含量和高硅质含量为特征,因具有可压裂性和页岩气“甜点”评价的多项关键要素使其成为页岩气开发的优选目标层位,其中硅质的物质来源、成因和成岩演化等逐渐成为页岩气勘探亟待解决的基础地质问题之一。

我国学者自20世纪90年代就开始开展我国南方下古生界海相层系硅质页岩的成因研究。黄志诚等^[23]对下扬子地区五峰组硅质页岩的成因进行了研究,认为是深海环境中的火山-生物作用形成。李文厚等^[24]在研究南郑地区上奥陶统的硅质岩时,发现其中含有大量的放射虫碎屑,分析认为形成于上升洋流作用下的深水陆棚环境。王玉净和张元

动^[25]在对下扬子仑山五峰组硅质岩中的放射虫研究后提出其形成于浅海环境的认识。然而受到技术条件和传统研究方法的限制,相关认识主要是基于古生物形貌描述和光学显微镜较小放大倍数观察基础之上获得的。

近年来,随着岩石样品离子抛光处理技术和高分辨率能谱技术的快速发展,扫描电子显微镜平台上获取页岩微观结构特征、微区成分组成和生物碎屑结构特征等信息成为可能。本文采用环境扫描电子显微镜、场发射扫描电子显微镜和高分辨能谱分析以及岩石精细抛光技术,结合X射线衍射分析,开展了五峰组-龙马溪组页岩的矿物特征和岩石学特征研究,力图通过显微特征分析揭示该海相硅质页岩层段中主矿物石英的主要成因及其微观孔隙发育特征,进而探讨其与页岩气富集的关系,为页岩气的勘探提供科学依据。

1 样品与分析

页岩样品采自中上扬子地区新辟露头剖面和中国石化渝东南探区重点钻井五峰组和龙马溪组岩心,测试分析在中石化油气成藏重点实验室完成。

全岩X射线衍射分析由德国布鲁克公司D8 ADVANCE型X射线衍射仪完成,在温度25℃和相对湿度50%的条件下,依据SY/T 5163-2010标准进行测试。仪器条件:Cu靶,X射线管电压40 kV、电流100 mA,步进式扫描,步进宽度 $0.02^\circ(2\theta)$,步进时间1 s。样品处理是在无污染条件下将页岩样品破碎至200目,取5 g左右混合均匀的样品粉末,采用正装法制样并进行X射线衍射分析,全岩矿物的定量分析在Rockquan2012软件平台完成。

显微形貌和成分分析在Quanta 200环境扫描

电子显微镜上完成。选择垂直于页岩样品的沉积层面进行离子精细抛光。高速离子束轰击样品表面,对页岩样品表面进行刻蚀,抛制成常规机械抛光所达不到的光滑镜面,从而避免机械抛光过程对岩样抛光面的破坏。首先将页岩样品沿垂直层理方向切割成合适大小的块体,然后使用德国徕卡 TXP 型精研一体机将页岩表面机械磨平,最后将磨好的页岩薄片放入德国徕卡 RES102 型离子减薄仪中,设定合适的工作参数,用氩离子轰击样品表面,工作电压为 5 kV,电流为 2.2 mA 左右,抛光时间为 3~4 h。样品抛光后做镀金膜处理,然后选择高真空扫描模式对页岩的微观形貌和结构特征进行观察。工作参数设置为:电压 20 kV,工作距离 7.5~25 mm,分辨率达到 12 nm。能谱为牛津 MAX50 能谱仪,探测器面积为 150 mm²,最大计数率为 200 000,峰背比为 200 000:1,分辨率为 200 eV。

微观孔隙结构分析在 FEI Helios NanoLab 650 型聚焦离子束扫描电子显微镜上完成。样品制备同上,抛光后样品表面不喷金,直接用导电胶固定在显微镜样品台上。仪器条件:加速电压 2 kV,束流 50 pA,工作距离 4 mm,二次电子图像分辨率 0.8 nm(2 kV)。

2 岩石和矿物组成特征

五峰组—龙马溪组虽在油气勘探开发领域被作为一整套地层看待,但实际上是两套不同的岩石地层单元。五峰组分为两个岩性段:下段为黑色硅质页岩段,主要为中—薄层硅质岩、含泥硅质岩夹笔石页岩,并发育多套 2~10 cm 的斑脱岩薄夹层,与硅质岩形成互层结构,这种互层结构在四川盆地北缘城口、东南缘沿河、道真和中扬子宜昌分乡等地均普遍发育(图 1),在宜昌地区互层结构数多达二十六层^[26],一直延续到龙马溪组底部;上段为钙质介壳灰岩段,即观音桥段,其在四川盆地的南部、东部和北部均广泛发育^[27]。龙马溪组分为 3 个岩性段:下部岩性段主要为灰黑色含碳质放射虫笔石页岩及灰黑色含粉砂碳质笔石页岩夹黄铁矿薄层或条纹,笔石化石丰富;中、上部岩性段主要为灰黑色含粉砂碳质泥岩与灰黑色含笔石碳质页岩,其间夹黄铁矿薄层、条带或条纹和中厚层灰色或灰黄色泥质粉砂岩和粉砂质页岩。

中上扬子地区五峰组和龙马溪组页岩的全岩矿物组成分析显示主要由石英、黏土矿物和碳酸盐矿



a—贵州沿河黑水剖面; b—贵州道真双河剖面; c—湖北利川清水剖面; d—重庆城口廖子剖面。

图 1 中上扬子地区五峰组—龙马溪组野外剖面照片

Fig.1 Photographs of outcrops of Wufeng - Longmaxi Formation in Middle and Upper Yangtze region

物组成,其中脆性矿物石英的含量普遍较高(图2)。五峰组页岩绝大部分样品的石英含量在50%以上,多数在75%左右,而黏土矿物含量较低;只有少部分样品的石英含量在50%以下,黏土矿物含量和碳酸盐矿物含量则较高。龙马溪组下段页岩样品石英含量在45%~55%范围内,龙马溪组中上段页岩样品石英含量整体较低,主体在20%~40%,黏土含量则在50%~75%,碳酸盐含量有所增加。

3 生物成因证据和放射虫分布特征

利用扫描电子显微镜对发育硅质页岩的五峰组和龙马溪组下部黑色页岩段进行观察研究,发现该段页岩中存在大量的具有生物结构的碎屑或团粒(图3a,b;图4a,b),它们主要以韵律性的薄层形式产出,自下而上韵律层由密集变为稀疏。含有生物

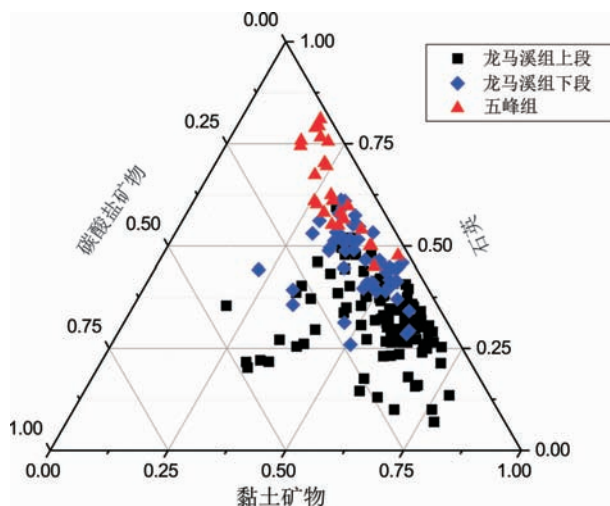
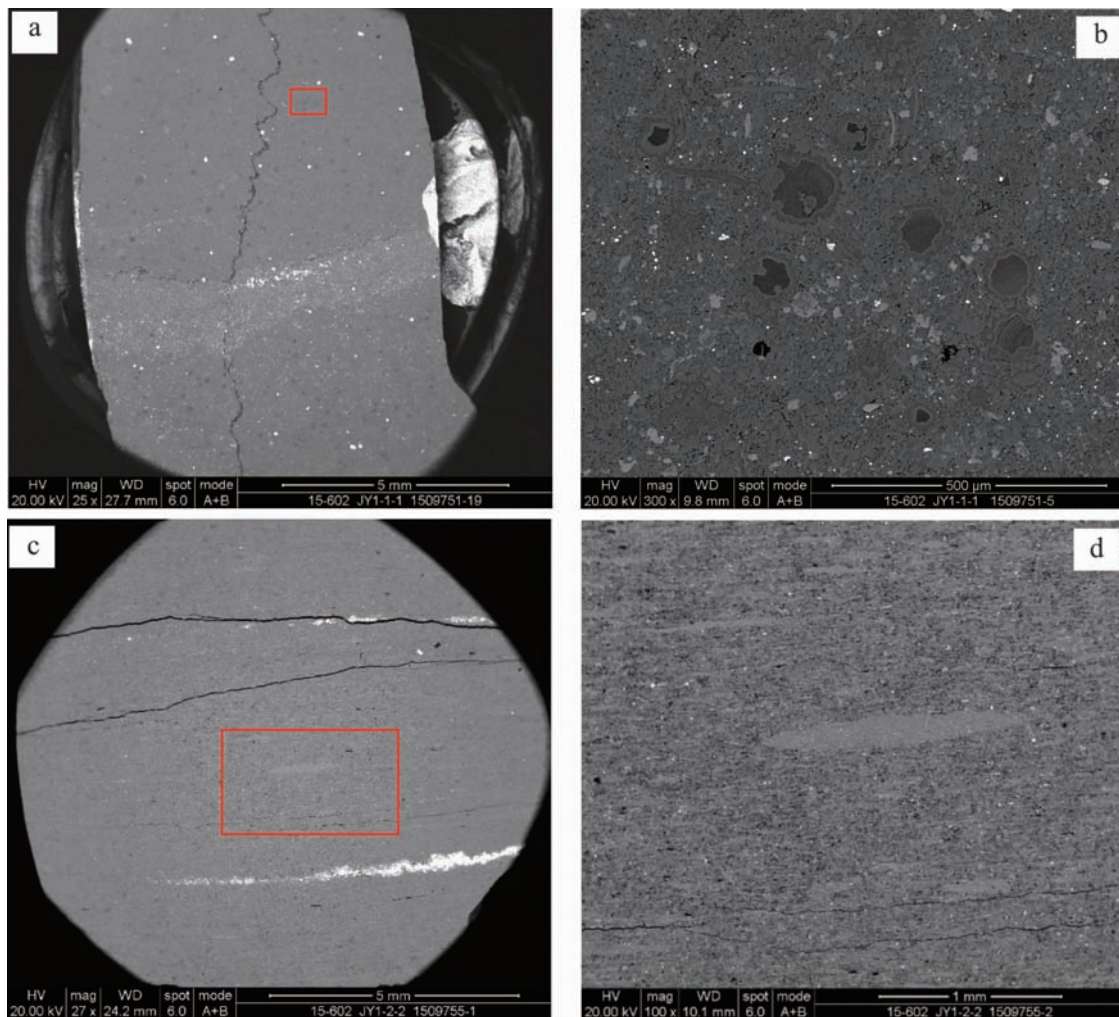


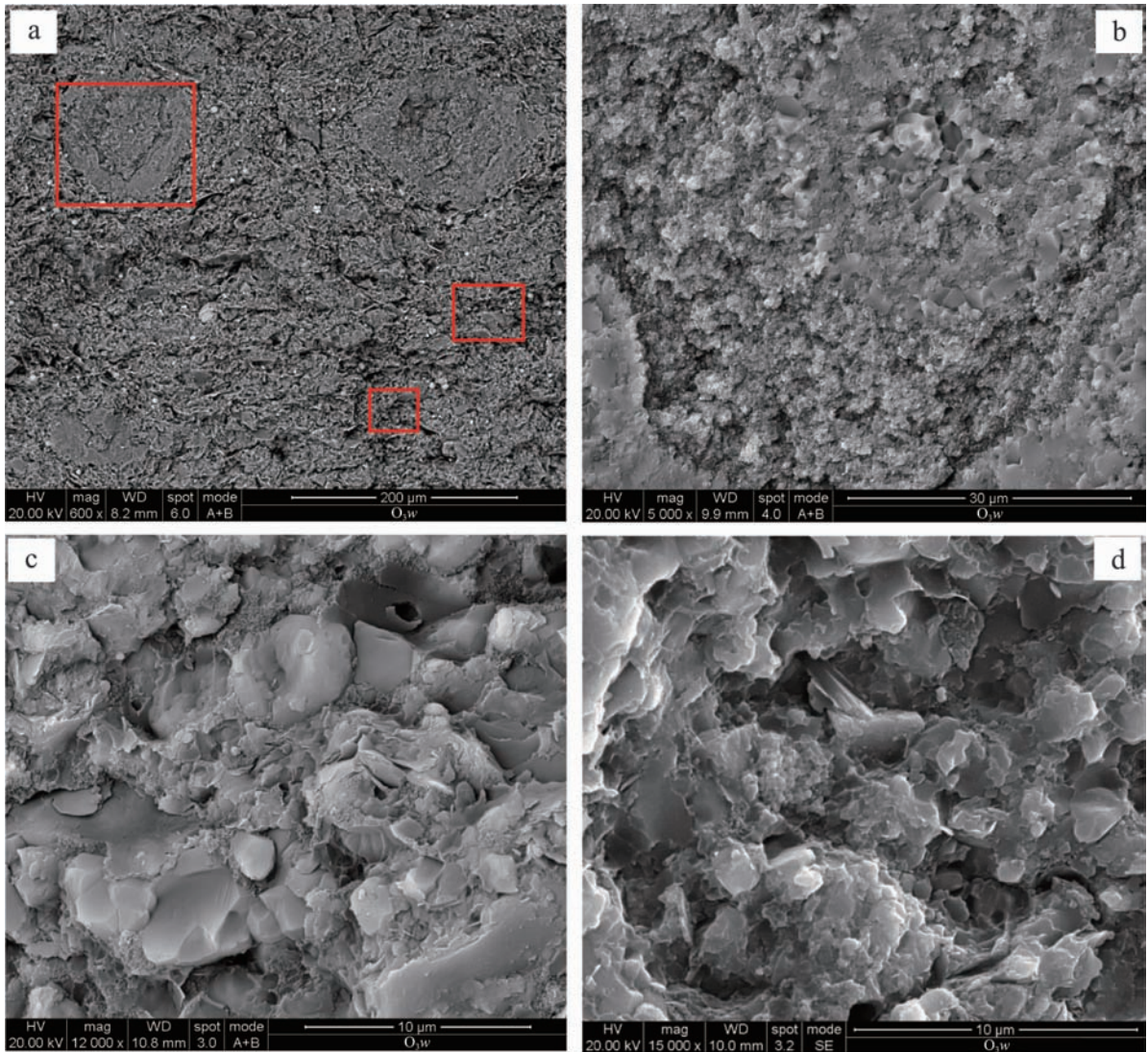
图2 中上扬子地区五峰组—龙马溪组矿物组成三端员图解
Fig.2 Ternary diagram of mineral composition of Wufeng - Longmaxi Formation in Middle and Upper Yangtze region



a—硅质页岩,富集放射虫;b—硅质页岩,为a图局部放大;c—泥质页岩(硅质页岩夹层),无放射虫;d—泥质页岩(硅质页岩夹层),为c图局部放大。

图3 焦页 A 井五峰组与龙马溪组下段硅质页岩微观结构特征

Fig.3 Microstructure characteristics of siliceous shale Wufeng Formation and lower section of Longmaxi Formation of well JY-A



a—富含放射虫硅质页岩,自然断面,垂直于层面;b—为a图放射虫结构放大;c、d—为a图放射虫间硅质胶结物。

图4 焦页A井五峰组与龙马溪组下段硅质页岩微观特征

Fig.4 Microscopic characteristics of siliceous shale Wufeng Formation and lower section of Longmaxi Formation of well JY-A

结构团粒的页岩,多呈团块状结构,以生物壳体为骨架颗粒与其他矿物基质胶结在一起,结构致密,发育高角度裂缝(图3a),矿物以石英为主,缺乏黏土矿物,排列无定向性(图3b);而不含生物结构团粒的页岩则呈层状结构,层理和纹层发育,且多发育水平和低角度微裂缝(图3c),结构不及前者致密,黏土矿物相对较多,排列具有明显的定向性(图3d)。

细致观察含生物结构团粒页岩样品的自然断面,见到大量斑块状、团块状的石英集合体,紧密堆叠在一起,之间有胶结物存在(图4a、b),胶结物多为呈叠置的片状、瓦状、卵状和球状的石英颗粒(图4c、d)。前者具有一定的生物轮廓和结构,能谱分析显示以硅质为主,同时含一定量的碳质,颗粒较大,大小在50~100 μm范围内,可能是生物骨架埋

藏、成岩由非晶态的生物硅质转变形成的石英集合体。后者则以颗粒形式产出,大小在2 μm以下,呈大小不等的液滴状、圆球状、棱球状,紧密胶结在一起,具隐晶质结构,表面相对光滑细腻,呈典型的蛋白石-CT硅球形貌特征,应是生物骨架经水-岩作用溶解后再经重结晶作用形成的自生石英。它们与极少量的黏土矿物片晶将放射虫骨架胶结起来,经压实等作用形成了坚硬的硅质页岩。

对含生物结构团粒的页岩样品进行精细抛光处理后再做进一步观察。在较大视域下可以看到紧密排布的圆形、椭圆形和近圆形黑色和灰色致密团块(图5a),有的还具有一根或多根放射状针刺结构(图5b)。继续放大后发现这些致密团块主要由具裙带状环形外边和环边包裹的内部实体物质组成,

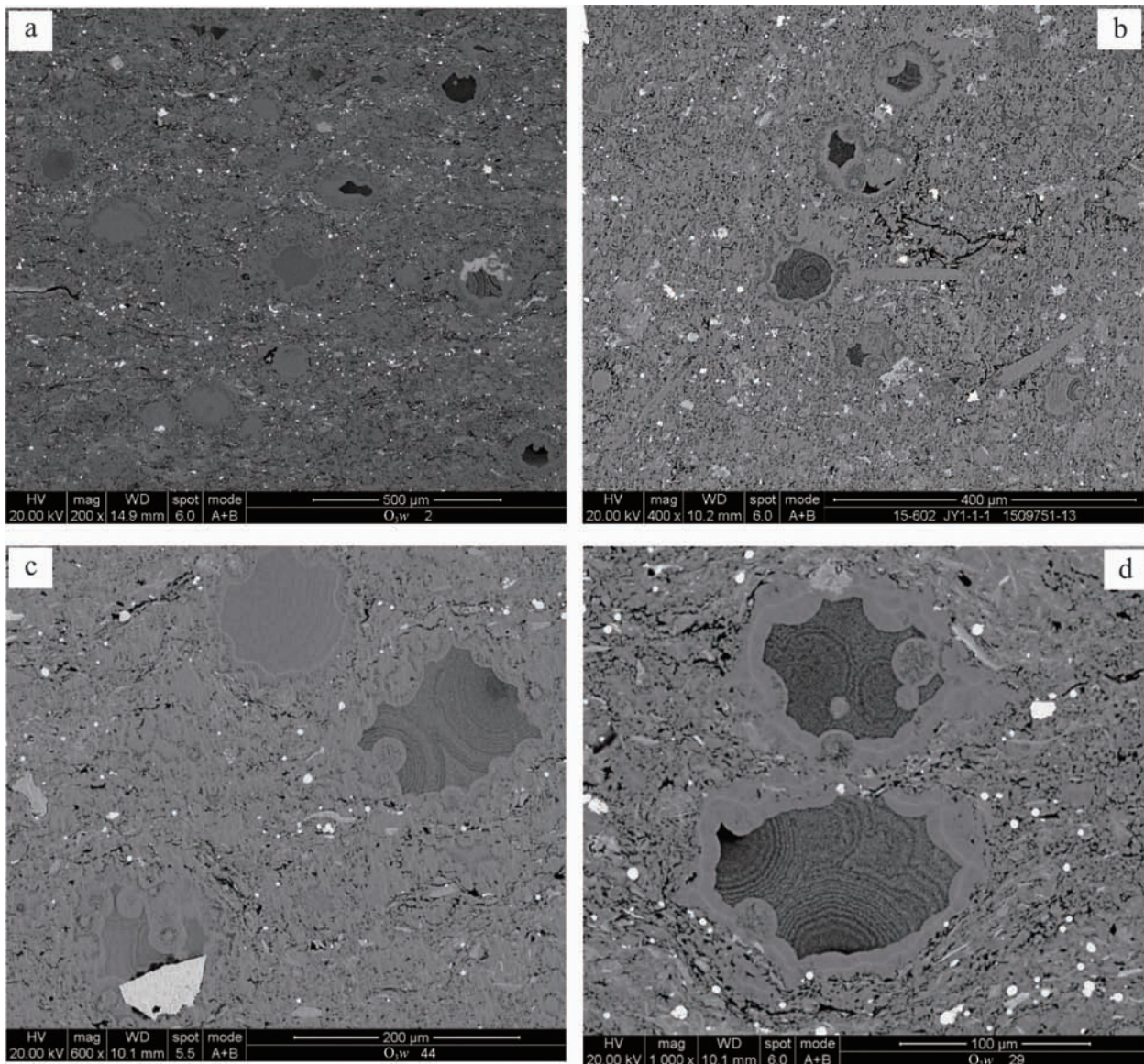


图5 焦页 A 井五峰组与龙马溪组下段硅质页岩中放射虫特征

Fig.5 Radiolarian characteristics of siliceous shale Wufeng Formation and lower section of Longmaxi Formation of well JY-A

有的环内呈黑、灰色相间的花纹状结构,有的则呈灰色均质实体结构,显示出明显的生物结构特征。密集的能谱分析结果显示这些生物结构无论是环状外边还是环内实体中的微颗粒均主要由硅、氧 2 种元素组成,说明其矿物主要由石英(SiO_2)组成,同时还含有一定量的碳元素,也反映出与生物密切相关。根据这些生物结构与成分特征和奥陶—志留纪所发育古生物的类型和特征综合判断,它们应是经成岩作用改造的硅质生物放射虫的骨架或残体。具裙带状的环形外边实际为放射虫的囊壁,内部实体为放射虫的囊体,放射状针刺结构则为放射虫的放射刺或放射棘,是放射虫的典型结构之一。进一步对这些特征性结构进行细致观察,发现具环状花纹的囊

体还呈现单个同心纹或多个同心纹两大样式,囊体内部还发育大小不等的球状构造,有的紧贴囊壁,有的则不与囊壁接触。具两个同心纹的大多呈侧向或背向倚靠状,纹的中心可见;具三个及以上同心纹的往往不完整,相互切割,纹中心多靠近囊壁,多不可见(图 5c,d),应属放射虫的筛网状构造,可能反映了放射虫体内细胞分裂、生长的过程。

利用能谱对所得放射虫微观结构进行面扫描分析,图 6 显示出各种元素的面分布特征。其中硅元素主要分布在放射虫壳体和周围硅质胶结物中,形成大范围的连片状结构;氧元素分布特征与硅相似,在放射虫壳体和周围硅质胶结物中,囊体内含量略低;碳元素则主要分布在放射虫囊体内及周围硅质

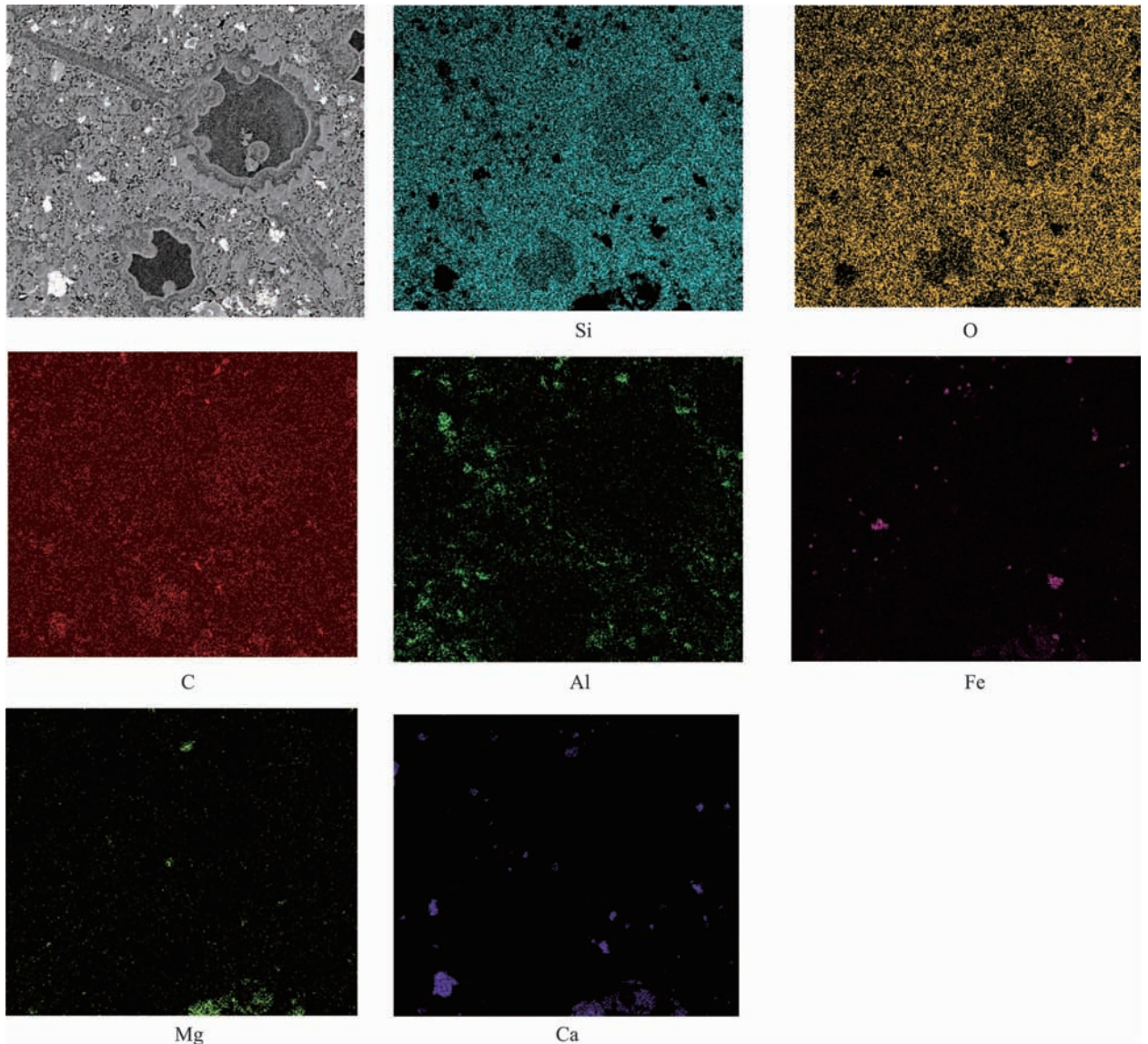


图6 焦页 A 井五峰组与龙马溪组下段放射虫硅质页岩元素面分布图

Fig.6 Elements surface distribution of radiolarian enriched siliceous shale of Wufeng Formation and lower section of Longmaxi Formation of well JY-A

胶结物中,显示与生物硅质关系密切;铝元素含量很低,主要分布在放射虫体外部,呈明显的轮廓状,与胶结物结合在一起,应是陆源输入后与放射虫一同沉积、埋藏形成的。铝元素在放射虫囊体内无分布,说明陆源物质并未进入囊体中,因此可以判定放射虫囊体内的硅质均为放射虫硅质自身来源;铁元素呈零星分布状,量极少,表明海底热液的活动极为有限。

五峰组—龙马溪组下段硅质页岩的微观结构和成分特征显示,硅质页岩中硅质生物——放射虫大量发育,页岩以放射虫硅质生物碎屑(石英)为主要的矿物支撑格架,同时陆源碎屑矿物含量很低且海

底热液活动极为有限,说明硅质岩中的硅质主要源于硅质生物的骨骼及其碎屑,而非陆源碎屑硅质输入和热液活动的结果,均为该段页岩的生物成因提供了最直接证据。

这套富含放射虫硅质页岩层段不仅在川东南地区五峰组—龙马溪组下部普遍发育,而且在川南、川东北和黔北地区甚至整个扬子地区(除古隆起区域)也广泛发育^[28-30],在已发现放射虫钻井和剖面中富含放射虫及海绵骨针等硅质生物的硅质页岩层段在五峰组和龙马溪组下段约占 60%^[23,25,28,30]。放射虫的生物沉积作用应是中上扬子地区该套地层硅质页岩形成的最主要原因和机制。

4 放射虫类型与沉积环境

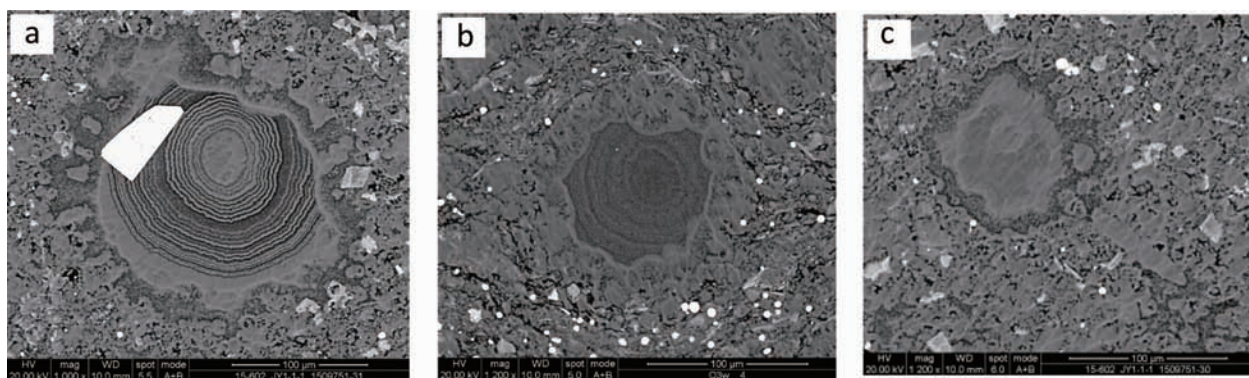
将研究样品中观察到的放射虫形貌与发表文献进行对比,研究它们的种属,发现主要为泡沫虫目和内射虫目下的不同科、属的放射虫,是放射虫中非常古老的类群,从寒武纪出现一直生活到现代,占放射虫属数量的一半以上。它们主要以球形放射虫为主,其中大多难以准确确定其种属,同时还含有少量其他种属的放射虫。图 7a 是泡沫虫目孔盘虫科下的海针膜虫(*Stylochlamydidium aequale*),盘扁平,全盘剖面结构非常清晰,具有一个球形或椭圆形的中心核,整个囊体围绕中心核呈密集状同心环状排列,具放射状的针刺从虫体盘缘表面伸出。由于经历了成岩作用,骨针发生了胶结而略显钝化,从而导致针形短粗,但长度较均一,略深的低温水体环境也可能是导致骨针短粗的原因。图 7b 是泡沫虫目核虫科下的剑锤虫(*Xiphactinella xiphactinella*),剖面结构清晰,具有一个球形中心核,围绕核体发育数个同心分布的环,囊壁相对简单,多呈圆形或椭圆形,主轴两极延伸出一对骨针,骨针相对较短,大小相同,虫体整体性质近于对称。图 7c 是内射虫目空滴虫科的空滴虫(*Inaniguttids*),具有不规则球形囊体和一根明显的长刺,囊体内有核但不居中,刺直略有弯曲,主刺长度多长于壳径,辅刺不甚发育或经成岩变形为小球状。除了上述能够确定属种的放射虫外,还有其他一些无法准确确定属种的放射虫,如疑似的果刺虫、空球虫和三轴六柱虫等等。

渝东南钻井岩心硅质页岩中放射虫的丰度较高,但种类相对略显单一,囊体形态显示分异度略低(图 5),且具有浅海-半深海环境放射虫组合类型^[31]

的一些特征。此外,这些放射虫个体普遍较大,囊壁厚且简单,说明在温度较低的环境中生活,扬子地区的古地理位置在赤道附近,只有较深的水体才具有低的水温条件,说明它们可能生活在较深水体的浅海环境中,综合判断研究区可能处于 100 m 左右水深半局限海盆环境。大量构造、沉积学研究表明这一时期盆地受周边挤压作用,黔中古隆起及川中古隆起继续隆升,围限了中上扬子海域,使其成为一个局限海湾或海盆,北部和西部通过水道与古秦岭洋相连^[16,27-28,32],其内潟湖发育,渝东南地区陆缘碎屑和淡水补给较弱,水体安静,与放射虫所反映的半深水环境相一致。

5 生物成因硅质与页岩气富集的关系

海相页岩中生物成因硅的存在对优质烃源岩的发育有重要影响。从焦页 A 井五峰组和龙马溪组页岩有机碳与硅质含量关系看,五峰组和龙马溪组下段页岩样品的 TOC 含量与石英含量呈明显正相关关系(图 8),其他学者在渝东南地区的研究也得出了相一致的结果^[20,33-34],表明该页岩层系中生物成因硅质的富集层段也是有机碳的高值段,是优质烃源岩的发育层段^[35]。巴奈特页岩的研究结果也显示其硅质含量很高而黏土矿物含量较低^[13],富黏土层段的有机碳(TOC)含量为 3%~13%,平均为 3.2%,而富硅层段的 TOC 含量为 4%~18%,平均为 7.1%^[10],其中 45% 的石英为富硅的放射虫和海绵骨针残体的蚀变产物^[36]。渝东南地区钻井和露头分析结果显示五峰组和龙马溪组下段硅质页岩的有机碳含量普遍高于泥岩层或所夹的泥岩薄层,且电镜视域下放射虫残体平均约占 40%,密集区域占到



a—五峰组与龙马溪组中下段海针膜虫;b—五峰组与龙马溪组中下段剑锤虫;c—五峰组与龙马溪组中下段空滴虫。

图 7 焦页 A 井五峰组与龙马溪组下段硅质页岩中放射虫类型

Fig.7 Radiolarian type of siliceous shale of Wufeng Formation and lower section of Longmaxi Formation of well JY-A

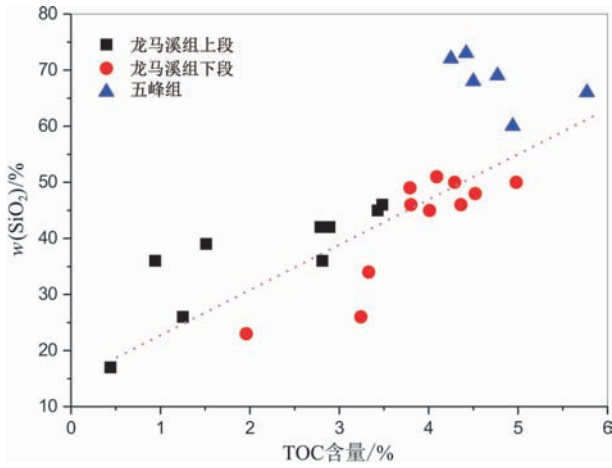


图8 焦页 A 井五峰组与龙马溪组页岩 TOC 含量与硅质含量关系图

Fig.8 Relationship between silica and TOC contents of siliceous shale of Wufeng Formation and lower section of Longmaxi Formation of well JY-A

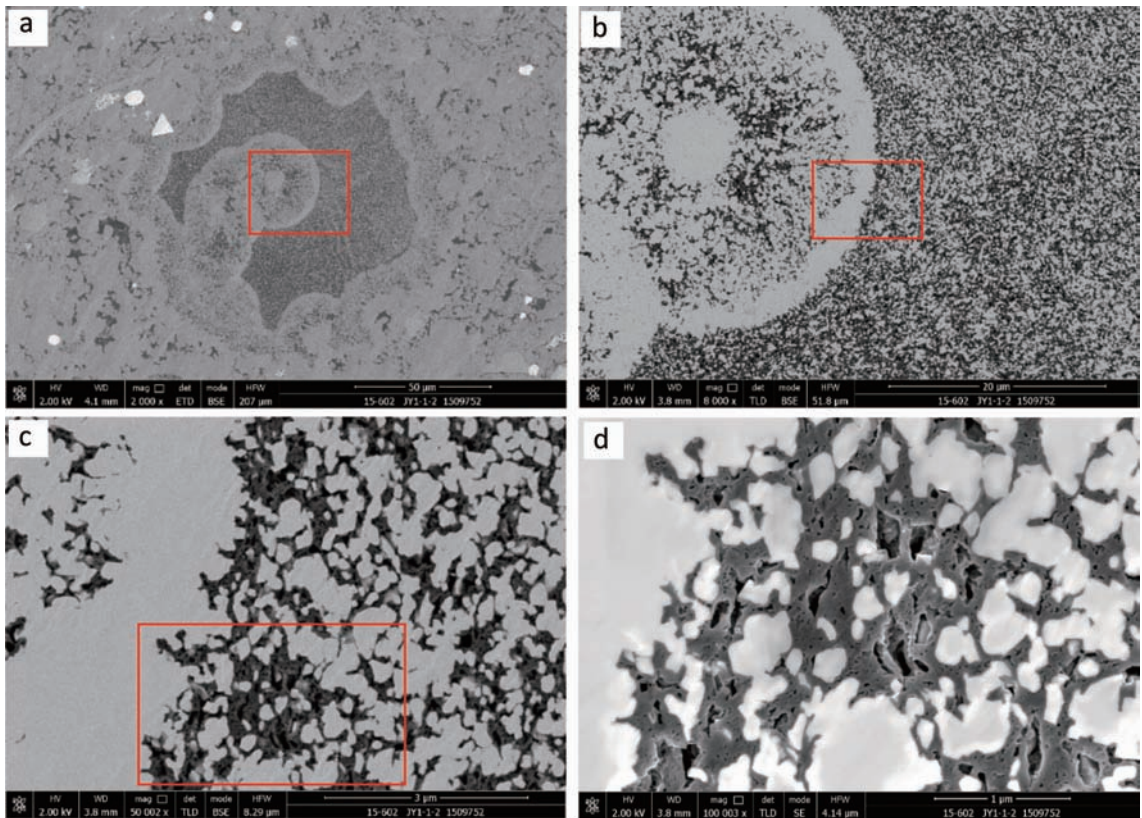
集的基本条件,而且也是其他海洋生物生长所必需的重要营养物质。在半深水沉积条件下,放射虫大量发育的环境实际代表的是一种极为有利于浮游生物,特别是浮游藻类生长的环境。大量海洋调查的结果显示硅元素含量的高低与水体中的初级生产力有良好的对应关系^[37],硅质生物大量发育时藻类也一同繁盛,生物来源硅质的富集层多是高的初级生产力层,充足的有机物质供给为优质烃源岩发育的提供了物质保证。

放射虫,尤其是泡沫虫科放射虫,有一个显著特点,就是可以将浮游藻类吸纳到它们囊体的空腔内一同生活,彼此形成相互依赖的共生体,并通过单体的大量聚集形成 m 到数 m 长度的集合体。死亡后快速沉降,使得沉积有机质得以有效保存,这是富含放射虫地层有机碳含量普遍较高的另一主要原因。五峰组—龙马溪组下部有机碳含量与石英含量具有正相关关系正是大量海洋硅质生物的原地沉积作用使得硅质与藻类一体沉积、埋藏和共生的结果。

此外,放射虫是一类非常原始的海洋浮游动物,对现代放射虫的化学组成进行研究发现其体内脂类

60%~70%。扬子地台北缘地区略低,显微镜下放射虫碎屑平均约 30%,少量达到 50%以上^[24]。

溶解态硅是重要的营养盐,海洋水体中较高浓度的硅不仅是放射虫、海绵骨针等硅质生物发育、富



a—放射虫, O₃w; b—为 a 图放射虫囊体局部放大; c—为 b 图放射虫囊体局部放大; d—为 c 图放射虫囊体局部放大。

图9 焦页 A 井五峰组与龙马溪组下段硅质页岩放射虫结构中有机孔隙发育特征

Fig.9 Organic pores in radiolarian of siliceous shale of Wufeng Formation and lower section of Longmaxi Formation of well JY-A

含量较高,跟硅藻的脂类含量接近,说明放射虫体内有机质不仅对总有机碳有贡献,而且还对生烃母质有贡献。因此,放射虫的富集为有机质的富集、保存和后期烃类的生成及有机孔隙的形成均提供了重要条件。

在储集空间方面,放射虫体营浮游生活,囊体表面和囊内均发育小孔和空腔^[38],如海针膜虫盘面具圆形或椭圆形小孔^[39],虽然在成岩过程中会被玉髓等充填,但仍有大量孔隙剩余。Slatt 等^[40]发现放射虫和海绵骨针等硅质生物的中空体腔在埋藏条件下大多能够保持开启状态,充分说明了具刚性的硅质生物囊体具有抗压实能力,有利于原生孔隙的保持和保存。对五峰组和龙马溪组下段页岩中放射虫进行高放大倍数观察,发现放射虫囊体内充填大量微晶石英,石英颗粒之间均填充热解沥青,沥青中则发育大量纳米级孔隙(图9),表明在有机质成熟转化为烃类这一阶段,放射虫囊体仍有大量剩余孔隙空间供液态烃类储集。随着成熟度升高,液态烃裂解成气,形成残余沥青和大量纳米孔隙,生成气体的同时也生成了大量页岩气的赋存空间,使得所生成的气体发生原位或近源聚集。此外,生物成因的硅质页岩由大量的硅质颗粒组成,整体上构成一个相对刚性的格架,抗压实能力较强,非常有利于有机孔隙的规模保存。

从上看出生物成因硅质不仅对烃源岩发育,而且对储集空间的发育均有重要影响,从而对页岩气的富集极为重要。在后期构造保存良好的条件下,生物硅质的富集层基本对应于页岩气的好产层,川东南焦石坝页岩气和北美 Woodford 页岩气^[41]均很好的证明了这一点,充分显示了生物成因硅质通过对烃源和储集空间两方面的直接影响进而起到对页岩气富集的控制作用。

6 结论

(1)海相页岩中的石英颗粒通常被认为是陆源碎屑经水流或风力搬运、沉积的结果。但中上扬子地区五峰组—龙马溪组下部硅质页岩中石英含量极高,而黏土和长石等陆源碎屑矿物含量相对较少,显微分析发现富硅层段含有大量的硅质生物——放射虫的碎屑和残体,以结晶态的微晶石英集合体或颗粒(硅球)形式存在,且是页岩的主要矿物支撑格架,说明硅质岩中的硅质主要来源于这些生物的硅质介

壳和骨骼,而并非陆源搬运而来或热液活动所致,为该段硅质页岩的生物成因提供了强有力的证据。

(2)生物成因硅质不仅对有机质的沉积、保存有重要作用,而且对泥页岩的结构、构造有重要影响作用,能够为烃类提供大量的纳米级储集空间,与页岩气的富集关系极为密切,从而使生物成因的硅质页岩层系具有多项页岩气“甜点”评价的关键要素,是页岩气开发的优选目标层位。因此,探讨海相硅质页岩的生物成因作用,有助于理解海相富硅质页岩的沉积、成岩和地球化学演化过程与规律,进而预测生物成因硅质页岩的空间展布特征,对页岩气的勘探与开发具有重要意义。

参考文献

- [1] OBERMAJER M, FOWLER M G, GOODARZI F, et al. Organic petrology and organic geochemistry of Devonian black shales in southwestern Ontario, Canada[J]. *Organic Geochemistry*, 1997, 26(3/4): 229-246.
- [2] CHEN J P, QIN Y, HUFF B G, et al. Geochemical evidence for mudstone as the possible major oil source rock in the Jurassic Turpan Basin, Northwest China[J]. *Organic Geochemistry*, 2001, 32: 1103-1125.
- [3] LI S M, PANG X Q, LI M W, et al. Geochemistry of petroleum systems in the Niuzhuang South Slope of Bohai Bay Basin: part 1: source rock characterization[J]. *Organic Geochemistry*, 2003, 34: 389-412.
- [4] 张林晔,宋一涛,王广利,等. 济阳拗陷湖相烃源岩有机质化学组成特征及其石油地质意义[J]. *科学通报*, 2005, 50(21): 2392-2402.
- [5] 蔡进功,卢龙飞,包于进,等. 烃源岩中蒙皂石结合有机质后层间水的变化特征及其意义[J]. *中国科学:地球科学*, 2012, 42(4): 483-491.
- [6] LOUCKS R, ROBERT M R, STEPHEN 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: 848-861.
- [7] 马永生,冯建辉,牟泽辉,等. 中国石化非常规油气资源潜力及勘探发展[J]. *中国工程科学*, 2012, 14(6): 21-29.
- [8] 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(增刊1): 107-114.
- [9] JARVIE D M. Components and processes affecting producibility and commerciality of shale resource systems[J]. *Geologica Acta*, 2014, 12: 307-325.
- [10] MONTGOMERY S L, JARVIE D M, BOWKER K A, et al. Mississippian Barnett Shale, Fort Worth basin, north-central Texas: gas-shale play with multi-trillion cubic foot potential[J]. *AAPG Bulletin*, 2005, 90(6): 963-966.
- [11] MILLIKEN K, SUK-JOO C, PETRO P, et al. “Cherty”

- stringers in the Barnett Shale are agglutinated foraminifera [J]. *Sedimentary Geology*, 2007, 198: 221-232.
- [12] ROSS D J K, BUSTIN R M. Shale gas potential of the Lower Jurassic Gordondale Member, northeastern British Columbia, Canada[J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 2007, 55(1): 51-75.
- [13] LEE D S D, HERMAN J D, ELSWORTH D, et al. A critical evaluation of unconventional gas recovery from the marcellus shale, northeastern United States[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2011, 15(4): 679-687.
- [14] 邹才能,董大忠,王社教,等.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, 36(6): 641-653.
- [15] 肖贤明,宋之光,朱炎铭,等.北美页岩气研究及对我国下古生界页岩气开发的启示[J].*煤炭学报*, 2013, 38(5): 721-727.
- [16] 刘树根,王世玉,孙玮,等.四川盆地及其周缘五峰组龙马溪组黑色页岩特征[J].*成都理工大学学报*, 2013, 40(6): 621-639.
- [17] 王玉满,董大忠,杨桦,等.川南下志留统龙马溪组页岩储集空间定量表征[J].*中国科学:地球科学*, 2014, 44(6): 1348-1356.
- [18] 郭彤楼,张汉荣.四川盆地焦石坝页岩气田形成与富集高产模式[J].*石油勘探与开发*, 2014, 41(1): 28-36.
- [19] 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.
- [20] 罗超,刘树根,孙玮,等.上扬子区下寒武统牛蹄塘组页岩气基本特征研究[J].*天然气地球科学*, 2014, 25(3):453-470.
- [21] 王红岩,刘玉章,董大忠,等.中国南方海相页岩气高效开发的科学问题[J].*石油勘探与开发*, 2014, 40(5): 574-579.
- [22] 林拓,张金川,李博,等.湘西北常页1井下寒武统牛蹄塘组页岩气聚集条件及含气特征[J].*石油学报*, 2014, 35(5): 839-846.
- [23] 黄志诚,黄钟瑾,陈智娜.下扬子区五峰组火山碎屑岩与放射虫硅质岩[J].*沉积学报*, 1991, 9(2): 1-14.
- [24] 李文厚,柳益群,尹凤娟,等.南郑梁山地区下古生界放射虫硅质岩的发现[J].*西北大学学报*, 1993, 23(1): 75-77.
- [25] 王玉净,张元动.江苏仑山地区上奥陶统五峰组放射虫动物群及其地质意义[J].*微体古生物学报*, 2011, 28(3): 251-260.
- [26] 苏文博,李志明,史晓颖,等.华南五峰组—龙马溪组与华北下马岭组的钾质斑脱岩及黑色岩系:两个地史转折期板块构造运动的沉积响应[J].*地学前缘*, 2006, 13(6): 82-95.
- [27] 陈旭,樊隽轩,张元动,等.五峰组及龙马溪组黑色页岩在扬子覆盖区内的划分与圈定[J].*地层学杂志*, 2015, 39(4): 351-358.
- [28] 刘伟,许效松,冯心涛,等.中上扬子上奥陶统五峰组含放射虫硅质岩与古环境[J].*沉积于特提斯地质*, 2010, 30(3): 65-70.
- [29] 冯增昭.沉积岩石学(上册)[M].北京:石油工业出版社, 1997: 8-10.
- [30] 王淑芳,邹才能,董大忠,等.四川盆地富有机质页岩硅质生物成因及对页岩气开发的意义[J].*北京大学学报*, 2014, 50(3): 1-12.
- [31] TAKUYA I. Depth-related radiolarian assemblage in the water-column and surface sediments of the Japan Sea [J]. *Marine Micropaleontology*, 2003, 47: 253-270.
- [32] 牟传龙,葛祥英,徐效松,等.中上扬子地区晚奥陶世岩相古地理及其油气地质意义[J].*古地理学报*, 2014, 16(4): 427-440.
- [33] 郭旭升,胡东风,文治东,等.四川盆地及周缘下古生界海相页岩气富集高产主控因素:以焦石坝地区五峰组—龙马溪组为例[J].*中国地质*, 2014, 41(3): 893-901.
- [34] 魏志红,魏祥峰.页岩不同类型孔隙的含气性差异:以四川盆地焦石坝地区五峰组—龙马溪组为例[J].*天然气工业*, 2014, 34(6): 37-41.
- [35] 秦建中,腾格尔,付小东,等.海相优质烃源层评价与形成条件研究[J].*石油实验地质*, 2009, 31(4): 366-373.
- [36] BOWKER K A. Recent developments of the Barnett Shale play, Fort Worth Basin[C]//LAW B E, WILSON M. Innovative gas exploration concepts symposium. Denver, Colorado: Rocky Mountain Association of Geologists and Petroleum Technology Transfer Council, 2002: 16.
- [37] RAGUENEA O, TREGUER P, LEVNAERT A, et al. A review of the Si cycle in the modern ocean: recent progress and missing gaps in the application of biogenic opal as a paleoproductivity proxy [J]. *Global and Planetary Change*, 2000, 26: 317-365.
- [38] 李文厚,梅志超,陈景维,等.陕西渭北奥陶系放射虫硅质岩与火山凝灰岩的成因环境[J].*中国区域地质*, 1997, 16(4): 422-427.
- [39] 谭智源,陈木宏.中国近海的放射虫[M].北京:科学出版社, 1999.
- [40] SLATT R M, 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.
- [41] COMER J B. Reservoir characteristics and gas production potential of Woodford Shale in the Southern Midcontinent [EB/OL]. (2007-01-09)[2012-08-12]. <https://scholarworks.iu.edu/dspace/handle>.