

页岩微观孔隙特征及源-储关系 ——以川东南地区五峰组-龙马溪组为例

胡宗全^{1,2}, 杜伟^{1,2}, 彭勇民^{1,2}, 赵建华³

[1. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石化页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 北京 100083;
3. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249]

摘要:页岩既是页岩气的烃源岩, 又是页岩气的储层。运用氩离子抛光扫描电镜技术对川东南地区五峰组-龙马溪组页岩的有机质、无机矿物、孔隙等微观特征进行描述, 将有机质、孔隙作为一个“源-储”系统来分析其空间分布状态与时间演化关系。研究表明, 有机质孔比无机质孔对赋存页岩气更重要; 迁移有机质比原地有机质更发育有机质孔。无机矿物孔隙赋存大量的迁移有机质, 在页岩气形成过程中发挥重要作用。五峰组-龙马溪组中含有较多的硅质等刚性颗粒矿物, 可以形成坚固的粒间孔隙体系, 在成油期孔隙度高、孔隙大且连通性好, 可以保存大量的迁移有机质。刚性颗粒粒间孔隙中赋存迁移有机质, 迁移有机质在其中演化成固态有机质, 其中的有机质孔中赋存天然气, 构成最佳的源-储匹配关系, 最有利于形成和富集页岩气。页岩中的粘土矿物晶间孔在早期的成岩阶段大多已丧失, 少量的在胶结物晶粒支撑与内部流体压力双重保护之下仍赋存有机质和有机质孔。黄铁矿集合体形成粒间和内部晶间孔隙, 部分孔隙可以赋存有机质和较小的有机质孔, 但总量有限。

关键词:有机质孔; 迁移有机质; 源-储关系; 五峰组; 龙马溪组; 页岩; 川东南地区

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

Microscopic pore characteristics and the source-reservoir relationship of shale —A case study from the Wufeng and Longmaxi Formations in Southeast Sichuan Basin

Hu Zongquan^{1,2}, Du Wei^{1,2}, Peng Yongmin^{1,2}, Zhao Jianhua³

(1. Petroleum Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China;

2. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, SINOPEC, Beijing 100083, China;

3. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: Shale serves as both hydrocarbon source rock and reservoir of shale gas. The microscopic features of the Wufeng and Longmaxi Fms shale in Southeast Sichuan Basin such as organic matters, inorganic minerals and pores are described with the technology of Argon ion milling and scanning electron microscope. The organic matters and the pores are regarded as a source-reservoir system to analyze the relationship between their spatial distribution and temporal evolution. The research shows that organic pores are more important than inorganic mineral pores in respect of hosting shale gas, and migrated organic matters develop more pores than in-situ organic matters. Inorganic mineral pores play an important role in the formation of shale gas by hosting abundant migrated organic matters. With plentiful rigid mineral grains such as quartz, the Wufeng and Longmaxi Fms shales had a hard intergranular pore system of inorganic minerals with high porosity, big pores and good connectivity in hydrocarbon generation stage, which can preserve abundant migrated liquid organic matter(oil). The migrated organic matters were stored in intergranular pores among rigid grains and then evolved into solid organic matter with organic pores by exsolution of gaseous hydrocarbons, and the gas filled the organic pores. This is the most favorable source-reservoir matching relation for the generation and enrichment of shale gas. Most of the intraplatelet pores in clay mineral aggregates had been lost in the early diagenetic stage, while a small amount of organic matters with organic pores were preserved under the support of cements and fluid pressure between the platelets. Pyrite aggregates form intergranular and intercrystal pores, part of which can preserve organic matter and organic pores with

收稿日期: 2015-08-17; 修订日期: 2015-10-20。

第一作者简介: 胡宗全(1971—), 男, 教授级高级工程师, 沉积与油气储层、致密与页岩油气地质与勘探。E-mail: huzongquan_syky@sinopec.com。

基金项目: 中石化科技攻关项目(G5800-13-ZS-KJB005)。

smaller size, but their total amount is limited.

Key words: organic pore, migrated organic matter, relationship of source and reservoir, Wufeng Formation, Longmaxi Formation, shale, Southeast Sichuan Basin

作为页岩气储集体的页岩要兼具烃源岩、储集岩的双重角色^[1-4]。随着有机质的增多,有机质孔在增多^[5-8],使页岩具有高有机质含量和高孔隙度的统一,即页岩气是一种源、储一体的天然气成藏系统。

在五峰组-龙马溪组页岩气被发现之前,前人对该套页岩的研究集中在烃源岩研究领域,主要关注由总有机碳含量所带来的生烃量多少(重量比),没有研究页岩中孔隙的多少(体积比)。在该层系发现页岩气之后,绝大多数研究集中于对纳米级有机质孔隙的研究,很少涉及到有机质分布及演化与无机组分之间的关系。运用源-储一体的研究思路,分析页岩中源(有机质)与储(无机孔和有机质孔)之间的空间配置、时间演化关系,对五峰组-龙马溪组页岩气形成机理有了更深入的认识。

1 页岩物质组成与孔隙构成

孔隙必须依附固体支撑格架而存在,也就是孔隙必须具有固体载体,在页岩储层中,除了矿物或岩屑颗粒、杂基和胶结物之外,还有一种不同于常规储层的孔隙载体,就是固态有机质,是有机质孔发育的载体^[9-12]。

从钻井纵向上来看,五峰组-龙马溪组由下向上有机质含量降低,硅质矿物含量降低,粘土矿物含量增多,相应地,有机质孔所占比例降低,粘土矿物孔隙增加,在底部页岩气最富集的层段,以有机质孔为主(图1)。

川东南地区五峰组-龙马溪组页岩储层中的矿物组成主要有硅质、粘土类矿物和其它非粘土类矿物(包括黄铁矿、碳酸盐岩矿物等)^[13-14]。五峰组-龙马溪组下部富有机质页岩中见有较多的化学或生物-化学沉积来源的硅质,前人研究认为硅质与有机质之间存在密切的成因关系,二者含量呈统计正相关关系^[15]。五峰组-龙马溪组页岩中大部分粘土矿物不发育孔隙,仅少部分可见到粘土矿物粒间孔、晶间孔(缝)。黄铁矿一般对应于强还原沉积环境或者与生烃演化有关^[16-18],黄铁矿晶间孔多以晶间-有机质复合孔形式存在。极少见到与碳酸盐岩相关的孔隙。

2 页岩孔隙类型及源-储关系

页岩既是页岩气的源岩,也充当页岩气的储层,有机质就是页岩气的提供者,即页岩气的“源”,各类孔隙是储存页岩气的空间,即页岩气的“储”。

2.1 有机质孔隙

2.1.1 迁移有机质

在五峰组-龙马溪组页岩中最常见的有机质是经过迁移的有机质,其特点是无确定的形态、大小不定、颜色均匀、固态部分没有明显结构差异性和非均质性、内部发育纳米级孔隙(图2a)。这种迁移的有机质在页岩成油阶段以液态石油的形式充注到无机矿物孔隙(主要为粒间孔隙)之中^[3,11,19-21],即所有被迁移有机质占据的体积都是在石油充注阶段的无机矿物孔隙。

TOC(总有机碳含量)的计算是运用重量百分比,将页岩作为储层来研究时,更需要关注有机质占据页岩的体积。如果页岩中的有机碳含量为5%(重量比),有机碳的密度按岩石比重的50%左右测算,则固体有机质部分就占据岩石近10%的孔隙体积,而有机质中还含有大约20%~40%的体积被有机孔占据,因此有机质中还含有占岩石总体积2%~4%的有机质孔孔隙度,使固体有机碳加有机质孔占岩石总体积的12%~14%,加上岩石内部其他约2%~4%的无机孔隙,则在石油充注阶段,页岩的孔隙度在14%~18%,从而能滞留下足够量的有机质。

迁移有机质中的有机质孔没有无机矿物充填,主要原因是其形成过程完全在有机质内部完成,没有水的介入和无机矿物胶结,因此有机质孔对页岩气的储集有效性好。

有机质孔的长轴方向一般与有机质的延伸方向大致一致,在靠近球形颗粒部位有机质孔甚至包绕着颗粒(图2a),指示有机质塑性变形对内部有机质孔的影响。有机质内部纳米孔的发育情况与其有机质载体有一定关系,单个有机质的体积越大,内部有机孔数量越多、孔径越大。从有机质的边缘向中心部位,有机质孔孔径有增大趋势,从边部的以小于100 nm为主向内部增大到以100~500 nm为主,到中心部位甚至以大于500 nm的为主,体现了气体向有机质中心富集的特征。在一些长度小于1 μm的有机质中,有机质孔的发育程度较差(图2a,b)。

有机质孔具有很好的连通性^[11,22-25]。图2a中有有机质中心部位的两个较大的有机质孔内部均有较小的有机质孔相连通(图2c),对这两个有机质孔和内部的小孔进行刻画(图2d),较大的2号纳米孔中发育的3个次级纳米孔普遍大于较小的1号纳米孔中的2个次级纳米孔,1号纳米孔长短轴比较小,其次级孔隙的

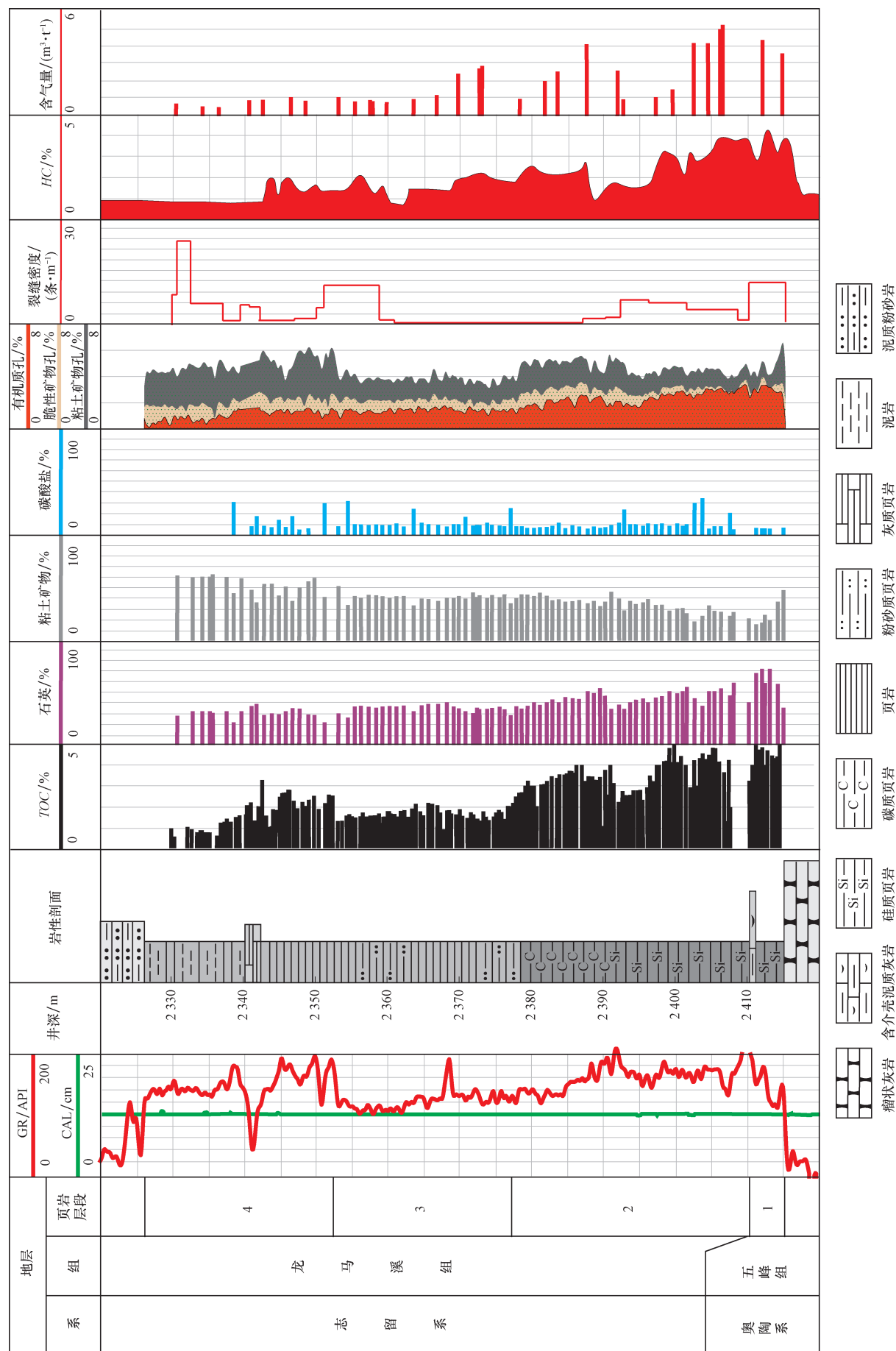


图1 川东南地区JY1井五峰组-龙马溪组页岩物质组成与孔隙构成

Fig.1 Material composition and pore ratio of the Wufeng and Longmaxi Formations shale in Well JY1 in the Southeast Sichuan Basin

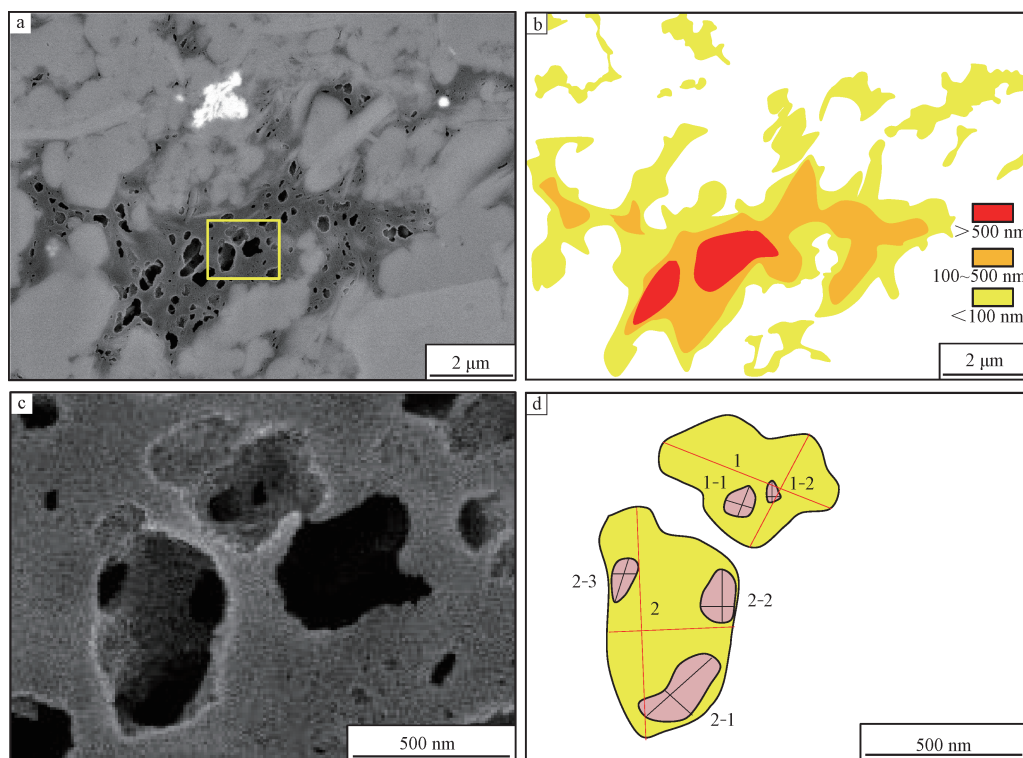


图2 川东南地区JY1井五峰组-龙马溪组页岩迁移有机质及其有机质孔微观特征

Fig. 2 Microscopic features of migrated organic matters with organic pores of the Wufeng and Longmaxi Formations shale in Well JY1 in the Southeast Sichuan Basin

a. JY1井,埋深2 402.5 m,迁移有机质及其有机质孔;b. 图a中有机质,越向有机质中心部位的有机质孔越大;c. 图a方框所示视域内,有机质孔及其内部的次级分支孔隙;d. 图c中两个较大的有机质孔及其内部次级孔隙

长短轴比也较小,说明有机质孔与其连通的次级有机质孔之间存在一定的成因联系。

2.1.2 原地有机质与生物碎屑

对五峰组-龙马溪组这种高演化程度的页岩(镜质体反射率(R_o)多在2.0%以上)^[26-28],与成烃生物相关的原地有机质已较少见。局部可见有机质与次生矿物共同组成颗粒形状,有机质与次生矿物呈间互状,内部结构有定向性,这可能是原地有机质,其在演化过程中一定程度上继承原始的生物体结构,次生矿物沿结构进行交代形成骨架,生成的石油就近充填在骨架支撑形成的孔隙中,并进一步演化为固态有机质和有机质孔,有机质孔中赋存页岩气(图3a)。与迁移有机质相比,原地有机质总含量较少。

在五峰组-龙马溪组页岩中还常见生物碎片,它们与迁移有机质一样呈深色,但又具有明显不同的结构特征。一是具有生物体的外形与结构特征,如图3b具有笔石的分节特征,图3c中的生物碎屑呈颗粒状,边界清晰平滑,图3d中呈明显的硅质骨架和外部包壳。二是基本不发育纳米孔,如图3b,c,图3d中暗色部分见到较大的纳米孔,但数量少、粒径大且单一,集中在500~1 000 nm内,并且形状一头大一头小、弯曲,靠近硅质颗粒发育,可能是在应力作用下,内部硅

质颗粒发生滑动、旋转、拆离形成此类孔隙。

2.2 无机矿物孔隙

对无机孔隙的研究,探讨其本身的现今储气能力仅是一个方面,更为重要的是分析各种无机孔隙与作为气源的固态有机质之间的源-储关系,并且分析各类无机孔隙与充填其中的有机质(孔)的演化关系。

2.2.1 颗粒相关孔隙

五峰组-龙马溪组页岩中的石英、长石等颗粒的粒径一般为1~30 μm,因此其粒间孔隙一般为1~5 μm,远大于有机质中的纳米级孔隙,而现在页岩中很难见到粒间孔隙,究其原因,就是这些较大的粒间孔隙已经被固态有机质所占据。没有被有机质充填的粒间孔隙极为少见,一般为局部孤立的粒间孔隙(图4a)或粒内孔隙(图4b)。

与颗粒相关的孔隙是赋存有机质的主要场所,即在石油充注期是页岩中最主要的孔隙类型。五峰组-龙马溪组页岩含有较高含量的石英等硬质颗粒(图4c),它们形成的支撑结构使页岩具有良好的无机矿物孔隙条件。部分生物碎屑也具有一定的支撑能力,但比硬质矿物颗粒要软,在与硬质矿物接触的地方常被压入(图4c),在页岩中普遍存在的粘土矿物更软而支

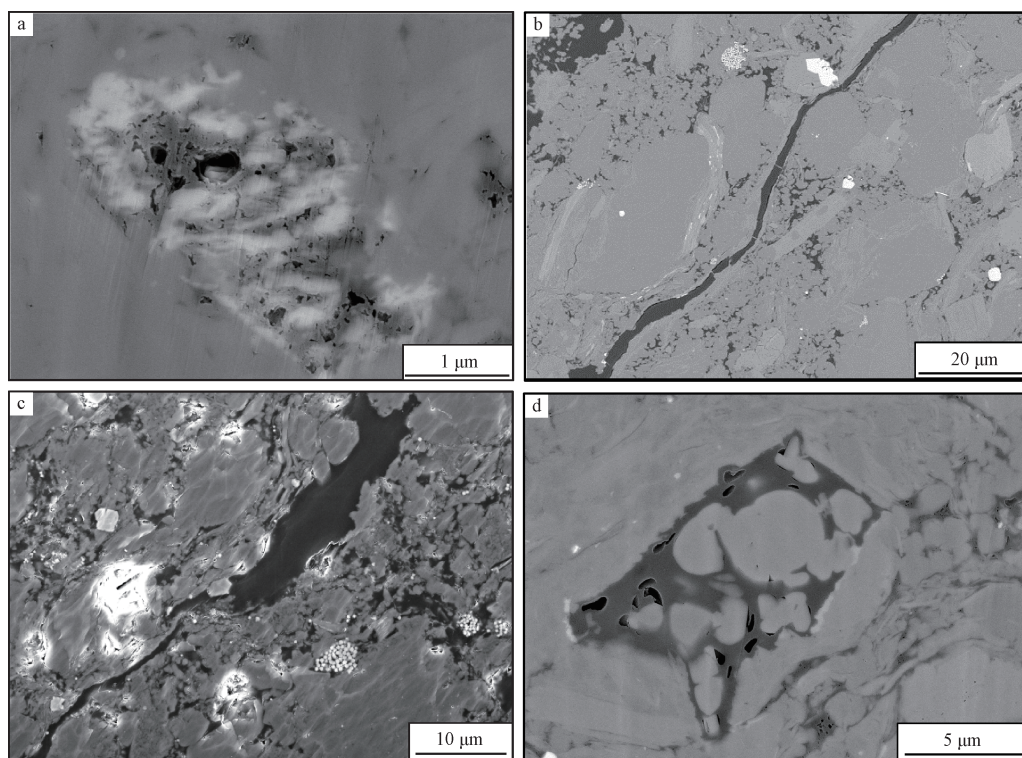


图3 川东南地区五峰组-龙马溪组页岩原地有机质与生物碎屑微观特征

Fig. 3 Microscopic features of in-situ organic matters and bio-detritus of the Wufeng and Longmaxi Formation shale in the Southeast Sichuan Basin

a. JY1 井,埋深 2 411.1 m,藻类体,有一定外形,内部部分被无机矿物充填,部分见有机质孔;b. PY1 井,埋深 2 147.0 m,笔石,内部不发育有机孔;c. JY4 井,埋深 2 593.1 m,生物碎屑,内部不发育有机孔;d. JY1 井,埋深 2 397.1 m,有机质包裹硅质,可能为原始生物体,有机质包裹壳中见少量较大的有机质孔

撑作用更差。将图 4c 中主要的支撑结构和其中的有机质刻画并分析其演化(图 4d—f)。

石英、生物碎屑和粘土共同组成孔隙格架,单纯由石英颗粒支撑的粒间孔隙一般具有长短轴相当的特征,而粘土与生物碎屑之间的孔隙则是狭长形,反映了孔隙载体性质的差异(图 4d)。无机孔隙基本上都是微米级的,在成油期石油可以经过短距离运移至这些孔隙中,从目前观察到距离原地有机质 1 μm 处就有粒间孔隙和迁移有机质存在,推测这种运移距离可能小到微米级(图 3a)。前已述及,当时页岩中的孔隙度普遍达 14% ~ 18%,有足够的空间赋存石油(图 4d, e)。此后,石油在孔隙系统内部裂解,一部分形成页岩气,一部分逐步稠化、固结为固态有机质(图 4f)。

2.2.2 粘土矿物孔隙

粘土矿物在沉积时是一种絮凝粒^[29-30],絮凝粒之间、絮凝粒与其他硬质颗粒(如石英、长石等)之间存在粒间孔隙,粘土矿物内部晶片之间存在晶间孔隙(图 5a, b),但由于粘土矿物质软而有塑性,因此粘土矿物的粒间孔隙和晶间孔隙不容易保留下来。在较大的流体压力条件下,这种孔隙可以充注石油,如果部分充注,则呈粘土晶间与有机质复合孔隙(图 5a);如果完

全被充注,则这类孔隙在石油充注期充当了有效孔隙,其中的石油在后来转化为固态有机质和有机质孔中的页岩气(图 5c, d)。

2.2.3 黄铁矿晶间孔隙

莓状黄铁矿是由多个六面体晶体堆积而成的球状集合体,直径大多在 3 ~ 10 μm ^[31-32],黄铁矿球状集合体经常与有机质相伴生。较早的黄铁矿球体较大、晶粒较大、晶体更完整,球状外形保持良好,与周围的硬质颗粒共同形成支撑结构,说明球体在强烈压实作用之前就已经固结,有机质与其边界清晰,有机质中靠近黄铁矿球体部位的有机孔有所增多(图 6a)。

部分黄铁矿聚合体内部晶粒间见有较多的缺陷,被有机质充填,有机质较多的部位黄铁矿晶粒较小,且六面体晶形不完善,见五边形、四边形甚至三角形。随着石油从一侧挤入,松散的黄铁矿球体被分成两半,两个半球之间形成支撑结构,其间的孔隙充填石油,后期演化为固态有机质和有机质孔(图 6b)。

黄铁矿集合体在页岩中呈局部、零星状分布,多个集合体的排列具有一定的定向性,可能指示渗流通道(图 6c)。黄铁矿晶粒之间有机质的最大宽度可达 500 ~ 600 nm,被有机质包围的黄铁矿晶粒形态不完

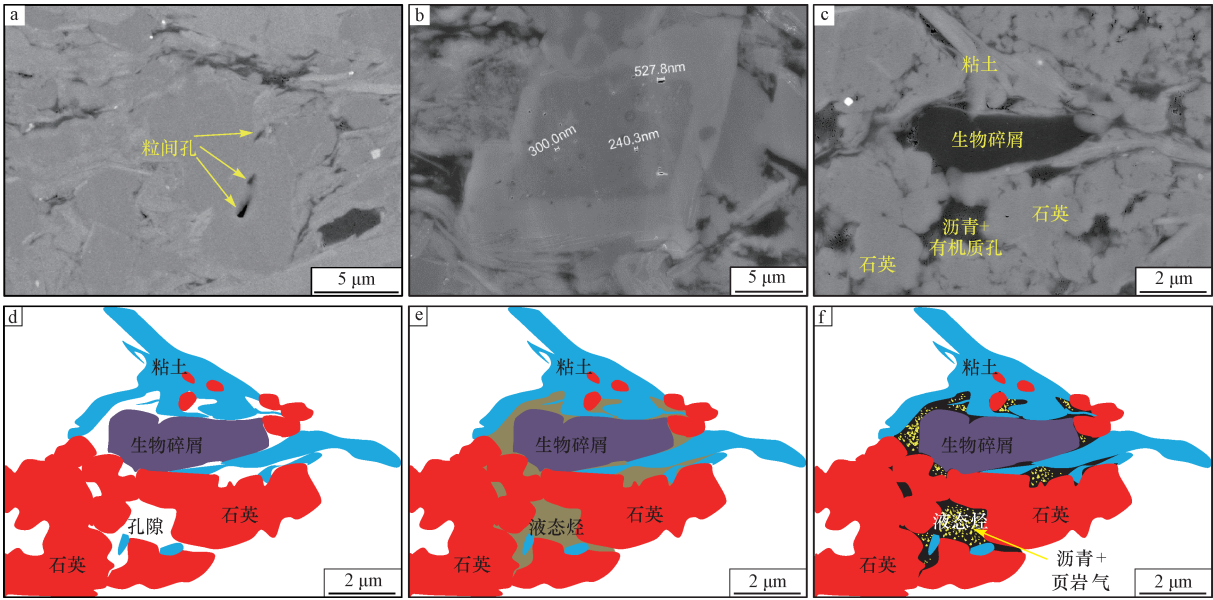


图4 川东南地区五峰组-龙马溪组页岩与颗粒相关的孔隙演化与源-储关系

Fig. 4 Relationship between grain-related pore evolution and source-reservoir system of the Wufeng and Longmaxi Formations shale in the Southeast Sichuan Basin

a. JY1 井,埋深 2 376.1 m,无机矿物粒间孔;b. NY1 井,埋深 4 411.5 m,无机矿物粒内孔;c. JY1 井,埋深 2 411.1 m,石英、粘土、生物碎屑构成的粒间孔隙中充填沥青,沥青内部发育有机质孔;d. 图 c 在液态烃充注前的示意图,石英、粘土、生物碎屑构成的粒间孔隙,孔隙大,局部孔隙度高;e. 液态烃充注于粒间孔隙中,粒间孔隙基本被充满,因此在有机质丰富时残余无机孔隙极少见;f. 液态烃进一步演化成固体沥青和气态烃,气态烃赋存于固体沥青内部的有机质孔中

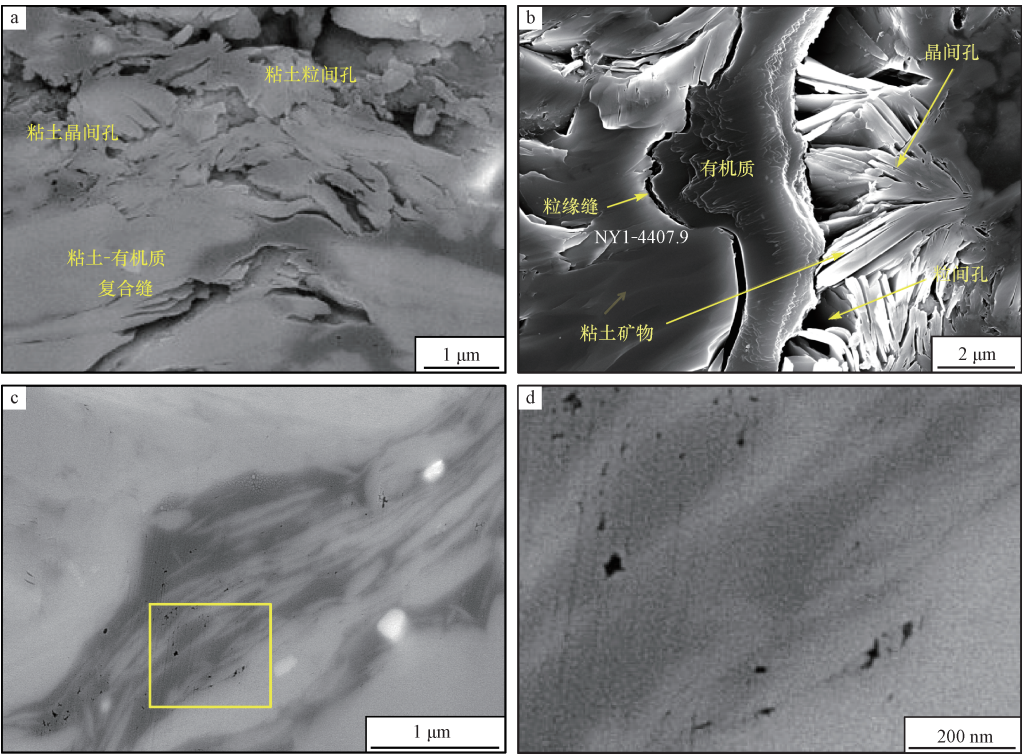


图5 川东南地区五峰组-龙马溪组页岩与粘土矿物相关的孔隙特征与源-储关系

Fig. 5 Relationship between clay mineral-related pore features and source-reservoir system of the Wufeng and Longmaxi Formations shale in the Southeast Sichuan Basin

a. JY1 井,埋深 2 414.9 m,粘土矿物相关的粒间孔、晶间孔和复合孔;b. NY1 井,埋深 4 407.9 m,粘土矿物相关的粒间孔与晶间孔,粘土矿物与有机质之间见有收缩缝;c. JY1 井,埋深 2 411.1 m,粘土矿物晶片间充填有机质,有机质局部见少量较小的有机质孔;d. 图 c 局部放大,有机质孔个体较小,一般 30 ~ 50 nm,圆度较低

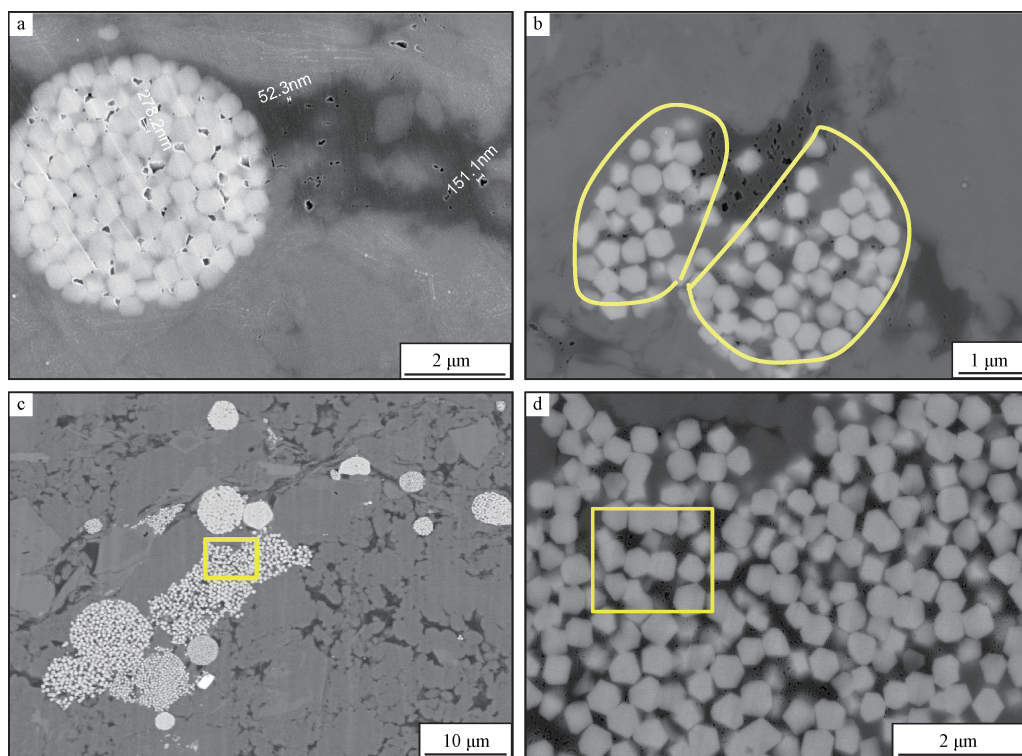


图6 川东南地区五峰组-龙马溪组页岩与黄铁矿相关的孔隙特征与源-储关系

Fig. 6 Relationship between pyrite-related pore features and source-reservoir system of the Wufeng and Longmaxi Formations shale in the Southeast Sichuan Basin

a. NY1井,埋深4 402.7 m,草莓状黄铁矿聚合体充当颗粒,形成支撑结构,粒间孔隙内充填迁移有机质;b. JY1井,埋深2 385.4 m,草莓状黄铁矿聚合体裂开,其间充填迁移有机质;c. JY1井,埋深2 411.1 m,草莓状黄铁矿聚合体呈一定方向性排列;d. 图c局部放大,黄铁矿六面体晶粒间充填有机质,见较小的有机质孔

善,见四边形。黄铁矿晶粒间有机质中的有机质孔最大直径大约在100 nm左右,中心部位的有机质孔一般较大(图6d)。

3 结论

1) 页岩气是源-储一体的天然气成藏系统,有机质、有机质孔的存在是其不同于常规天然气储层的关键特征,有机质与有机质孔、无机矿物孔隙之间的空间关系与时间演化是页岩气形成与富集机理的核心问题之一。

2) 孔隙必须依靠固态的孔隙载体而存在,孔隙载体控制着孔隙的类型、大小、形态、分布和演化,从而控制页岩气的形成与富集的作用。

3) 迁移有机质内的有机质孔是最主要的页岩气储存空间,在五峰组-龙马溪组页岩中,硅质等硬质矿物粒间孔隙是成油期的主要孔隙类型,具有较高的孔隙度而赋存大量迁移有机质,在后期演化为固体有机质并作为有机质孔的载体,从而大量赋存页岩气。原地有机质在形成迁移有机质的同时仍具有固体格架,发育少量有机质孔或复合孔隙,但在高演化阶段,原地有机质较少见。

4) 在成油期之前,粘土矿物晶间孔隙已大部分丧失,但仍有部分晶间孔隙在晶片间黄铁矿晶粒和流体压力的支撑作用下是张开的,可以赋存有机质。黄铁矿聚合体可支撑粒间孔,内部晶粒间可形成晶间孔,均可以赋存有机质和有机质孔。但粘土矿物晶间孔和黄铁矿晶间孔中赋存的有机质总量较少,有机质孔少而小。

致谢:本文涉及的钻井岩心样品、部分原始数据和部分照片源自中国石化勘探分公司、江汉油田分公司及华东分公司,一并表示谢忱!

参 考 文 献

- [1] Curtis J B. Fractured shale-gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86 (11): 1921 - 1938.
- [2] 张金川, 金之钧, 袁明生, 等. 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.
- [3] Jarvie D M, Hill R J, Ruble T E, et al. Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 475 - 499.
- [4] 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, 37(6): 641 - 653.
Zou Caineng, Dong Dazhong, Wang Shejiao, et al. Geological charac-

- teristics, formation mechanism and resource potential of shale gas in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2010, 37(6): 641–653.
- [5] 王飞宇, 关晶, 冯伟平, 等. 过成熟海相页岩孔隙度演化特征和游离气量[J]. *石油勘探与开发*, 2013, 40(6): 764–768.
Wang Feiyu, Guan Jing, Feng Weiping, et al. Evolution of overmature marine shale porosity and implication to the free gas volume[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(6): 764–768.
- [6] 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.
- [7] 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[J]16.
- [8] 涂乙, 邹海燕, 孟海平, 等. 页岩气评价标准与储层分类[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(1): 153–157.
Tu Yi, Zou Haiyan, Meng Haiping, et al. Evaluation criteria and classification of shale gas reservoirs[J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(1): 153–157.
- [9] Reed R M, Loucks R G. Imaging nanoscale pores in the Mississippian Barnett Shale of the northern Fort Worth Basin[C]. *AAPG Annual Convention Abstracts*, 2007.
- [10] Ruppel S C, Loucks R G. Black mudrocks: Lessons and questions from the Mississippian Barnett Shale in the southern midcontinent[J]. *The Sedimentary Record*, 2008, 6(2): 4–8.
- [11] 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.
- [12] 李军, 路菁, 李争, 等. 页岩气储层“四孔隙”模型建立及测井定量表征方法[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(2): 266–271.
Li Jun, Lu Jing, Li Zheng, et al. ‘Four-pore’ modeling and its quantitative logging description of shale gas reservoir[J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(2): 266–271.
- [13] 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. Characteristics of shale lithofacies and reservoir space of the Wufeng-Longmaxi Formation, Sichuan Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(6): 691–698.
- [14] 曾祥亮, 刘树根, 黄文明, 等. 四川盆地志留系龙马溪组页岩与美国 Fort Worth 盆地石炭系 Barnett 组页岩地质特征对比[J]. *地质通报*, 2011, 30(2): 372–384.
Zeng Xiangliang, Liu Shugen, Huang Wenming, et al. Comparison of Silurian Longmaxi Formation shale of Sichuan basin in China and carboniferous Barnett Formation shale of Fort Worth basin in United States[J]. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(2): 372–384.
- [15] Dennett M R, Caron D A, Michaels A F, et al. Video plankton recorder reveals high abundances of colonial radiolarians in surface waters of the central North Pacific[J]. *Journal of Plankton Research*, 2002(8), 24: 797–805.
- [16] Canfield D E, Raiswell R, Bottrell S H. The reactivity of sedimentary iron minerals towards sulphide[J]. *American Journal of Science*, 1992, 292(9): 659–683.
- [17] Bond S, Wignall P B, Racki G. Extent and duration of marine anoxic during the Frasnian-Famennian (Late Devonian) mass extinction in Poland, Germany, Austria and France[J]. *Geological Magazine*, 2004, 141(2): 173–193.
- [18] Taylor K G, Macquaker J H S. Iron minerals in marine sediment records chemical environments[J]. *Elements*, 2011, 7(2): 113–118.
- [19] Loucks R G, Reed R M, Ruppel S C, et al. Spectrum of pore types and networks in mudrocks and a descriptive classification for matrix-related mudrock pores[J]. *AAPG Bulletin*, 2012, 96(6): 1071–1098.
- [20] 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.
- [21] Cardott B J, Landis C R, Curtis M E. Post-oil solid bitumen network in the Woodford Shale, USA—A potential primary migration pathway[J]. *International Journal of Geology*, 2015, 139: 106–113.
- [22] Ambrose R J, Hartman R C, Diaz-Campos M, et al. New pore-scale considerations for shale gas in place calculations[C]. *Pennsylvania: Society of Petroleum Engineers Unconventional Gas Conference*, 2010: 17.
- [23] Curtis M E, Ambrose R J, Sondergeld C H. Structural characterization of gas shales on the micro and nano scales[C]. *Calgary: Canadian Unconventional Resources and International Petroleum Conference*, 2010: 15.
- [24] Sondergeld C H, Ambrose R J, Rai C S, et al. Microstructural studies of gas shales[C]. *Society of Petroleum Engineers Unconventional Gas Conference*, Pittsburgh, Pennsylvania, 2010: 17.
- [25] 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.
- [26] 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(自然科学版)*, 2013, 40(6): 621–639.
Liu shugen, Wang Shiyu, Sun Wei, et al. Characteristics of black shale in Wufeng Formation and Longmaxi Formation in Sichuan Basin and its peripheral areas[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2013, 40(6): 621–639.
- [27] 王志刚. 涪陵焦石坝地区页岩气水平井压裂改造实践与认识[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(3): 425–430.
Wang Zhigang. Breakthrough of Fuling shale gas exploration and development and its inspiration[J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(3): 425–430.
- [28] 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.
Guo Tonglou, Zhang Hanrong. Formation and enrichment mode of Jiaoshiba shale gas field, Sichuan Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(1): 28–36.
- [29] Boggs S Jr. Principles of sedimentology and stratigraphy[M]. Columbus, Merrill Publishing Co., 1987: 784.
- [30] Kranck K, Smith P C, Milligan T G. Grain-size characteristics of fine-grained unflocculated sediments II: “Multi-round” distributions[J]. *Sedimentology*, 1996, 43(3): 597–606.
- [31] Wilkin R T, Barnes H L. Formation processes of framboidal pyrite[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, 61(2): 323–339.
- [32] Ohfuji H, Rickard D. Experimental syntheses of framboids—a review[J]. *Earth Science Reviews*, 2005, 71(3–4): 147–170.