

川南地区下古生界海相页岩微观储集空间类型

蒲泊伶¹, 董大忠², 吴松涛³, 耳 闯¹, 黄金亮², 王玉满²

(1. 西安石油大学地球科学与工程学院, 陕西西安 710065; 2. 中国石油集团科学技术研究院, 北京 100083;
3. 中国石油天然气股份有限公司勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要:为探明不同成因的孔隙对页岩气储集的贡献,基于多种分析测试手段,对川南地区下古生界海相页岩微孔类型与分布、孔隙定量表征进行研究,并探讨页岩中微观储集空间的成因及影响因素。结果表明:下古生界页岩微观储集空间分为矿物基质孔、有机孔和微裂缝 3 大类,并可进一步细分为 9 种类型;龙马溪组页岩主要发育有机质孔和黏土矿物层间孔,五峰组页岩主要发育有机质孔和溶蚀孔、缝,九老洞组页岩有机质孔极少,多见溶蚀孔、缝;下古生界 3 套页岩孔隙类型与分布特征的差异与矿物组成、有机质丰度和成岩演化作用有关;龙马溪组底部页岩微孔发育,比表面积大,为页岩气的吸附提供大量储集空间,是有利的页岩储层发育段。

关键词:下古生界页岩;微观储集空间;成因类型;页岩气;川南地区

中图分类号:TE 122.2 **文献标志码:**A

引用格式:蒲泊伶,董大忠,吴松涛,等.川南地区下古生界海相页岩微观储集空间类型[J].中国石油大学学报:自然科学版,2014,38(4):19-25.

PU Boling, DONG Dazhong, WU Songtao, et al. Microscopic space types of Lower Paleozoic marine shale in southern Sichuan Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38(4): 19-25.

Microscopic space types of Lower Paleozoic marine shale in southern Sichuan Basin

PU Boling¹, DONG Dazhong², WU Songtao³, ER Chuang¹, HUANG Jinliang², WANG Yuman²

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;
2. CNPC Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China;
3. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China)

Abstract: To ascertain the contribution of different pores to shale gas reservoir, pore types, size and distribution of Lower Paleozoic marine shale in southern Sichuan Basin were studied using a variety of analytical testing methods. Pore space characteristics and influencing factors were discussed. The results show that Lower Paleozoic shale reservoir space can be divided into three main types, including mineral matrix pores, organic pores and micro-fractures, and can be further subdivided into nine types. Organic pores and interlayer pores between clay minerals are mainly developed in Longmaxi shale. Organic pores, dissolution pores and fractures are mainly developed in Wufeng shale. Organic pores are rarely in Jiulaodong shale, where dissolution pores and fractures are well distributed. Pore types and distributions show differences in Lower Paleozoic shales, which are mainly affected by mineral composition, the abundance of organic matter and diagenetic evolution. Micropores are developed in Lower Longmaxi shale, with high specific surface area, providing a bulk of reservoir spaces for shale gas adsorption, which makes it a beneficial shale reservoir.

Key words: Lower Paleozoic shale; microscopic space types; genetic type; shale gas; southern Sichuan Basin

页岩是一种颗粒较细、非均质性强、矿物组成复杂、岩性致密的非常规油气储层,页岩中发育有机质

收稿日期:2013-12-20

基金项目:国家“973”计划项目(2013CB228000);国家科技重大专项(2011ZX05-18-001);西安石油大学博士科研启动基金项目(2014BS07)

作者简介:蒲泊伶(1981-),女,讲师,博士,主要从事页岩气富集地质条件的研究。E-mail:sd_yujiao@sina.com。

地保存下来^[6]。压实过程中,黏土矿物发生脱水作用而析出大量的层间水,在“絮状体”层间形成微孔隙。川南地区下古生界页岩的黏土矿物主要为伊利石、伊蒙混层(I/S)与绿泥石,含量主体分布在30%~70%。据扫描电镜观察统计,黏土矿物层间孔通常长0.5 nm~2 μm、宽50~300 nm,呈扁平状或扁豆状(图2(d)),占总孔隙的45%~55%,相互连通性较好,是下古生界页岩中重要的孔隙类型。

2.1.2 脆性矿物粒间孔

脆性矿物粒间孔主要发育在脆性矿物(如石英、长石、方解石等)颗粒周围,呈不规则状、串珠状或分散状,其孔径与矿物颗粒大小、压实程度有关。在页岩储层中,受脆性矿物颗粒支撑,颗粒间未被充填的粒间孔随着压实和成岩作用增强而减少。通常在压实作用下,黏土矿物颗粒和有机质会发生塑性变形充填到孔隙中,加速了粒间孔的减少,甚至使其消失。此外片状的黏土矿物颗粒在压实作用过程中由于塑性变形,会在脆性矿物颗粒边缘产生次生粒间孔。

由于下古生界页岩地层中脆性矿物相对含量较低,主体呈分散状镶嵌于黏土矿物中,脆性矿物颗粒极少相互接触,不能形成颗粒支撑,因此脆性矿物形成的孔隙较少。主要存在于少量的脆性矿物颗粒(或晶粒(图2(b)))之间以及脆性矿物颗粒与黏土矿物颗粒之间。下古生界页岩具有高成岩阶段、高成熟的特点,脆性矿物粒间孔在成岩过程中在压实及压溶作用下急剧减小甚至消失,孔径一般小于1 μm。

2.1.3 粒内溶蚀孔

粒内溶蚀孔发育在颗粒内部(图2(f)),数量较多,呈港湾状、蜂窝状或分散状。其为酸性水介质条件下不稳定矿物的易溶部位发生溶蚀作用而形成,以长石及方解石溶蚀孔最为常见,孔隙直径200 nm~1 μm。发育在颗粒内部的溶蚀孔连通性差,通过人工造缝也很难将大多数孔连接起来,对页岩气储集的贡献不大。

2.1.4 黄铁矿晶间孔

下古生界页岩中黄铁矿多以草莓状集合体出现,草莓状黄铁矿为等粒度的亚微米级黄铁矿晶体或微晶体紧密堆积而成^[7-8],多发育在富有机质页岩层段(TOC大于2%)。草莓状黄铁矿集合体紧密排列的晶体间存在微孔隙,其孔径为50~100 nm,孤立地发育在黄铁矿集合体内部,相互不连通(图2(c))。下古生界页岩中黄铁矿含量较少,主体分布

在2%~6%,黄铁矿晶间孔可能不会对页岩气的储集起很大的作用。

2.2 有机孔

2.2.1 有机质孔

有机物质大多以分散状分布在矿物颗粒中或包裹在矿物颗粒周围(图2(g)),呈蜂窝状、线状、串珠状及复杂网状等。由于黏土矿物具有强烈的吸附作用,一部分有机质被黏土矿物吸附,在多孔絮状体内聚集,这种黏土矿物与有机质的集合体还经常充填在黄铁矿的晶体周围,这些被黏土矿物吸附的有机质中也发育一定的孔隙空间(图2(h))。有机质孔的孔径大体分布在50~200 nm,数量众多,据观察统计,有机质孔约占总孔隙的15%~25%,是页岩气储集的重要空间类型。

2.2.2 生物孔

生物体死亡后沉积埋藏,外壳不易腐烂保存下来,生物体腔内若未被充填则形成生物体腔孔。这种孔隙与生物碎屑伴生,连通性不高,孔隙度有效性差。下古生界海相页岩中偶见粪球粒,粪球粒(图2(i))是有机质、黏土质或粉砂质颗粒碎屑在动物体内混杂后的产物^[4],粒内发育纳米级微孔隙,其数量较少,连通性差。

2.3 微裂缝

川南下古生界海相页岩中微裂缝发育,主要分为构造微缝和非构造裂缝两大类型,以构造微缝为主。川南地区下古生界构造微缝十分发育(图2(j)),主要形成于局部构造压力释放区,如构造背斜及向斜的核部。通常成组出现在多套岩层中组成多组裂缝体系,与层面近垂直或斜交,比较平直,在区域上具有明显的方向性和规律性。单条裂缝一般延伸长,缝宽变化大,从0.2~2 cm都有分布,裂缝面比较平整规则。通常情况下构造裂缝在后期成岩作用中被方解石等所充填,对于页岩气的储集无贡献作用,但方解石脆性大,在人工压裂中易重新开启提高页岩的渗透性,可在页岩气的开采中起到积极的作用。

非构造裂缝包括成岩收缩缝、溶蚀缝等,这类裂缝的形成与区域应力场和构造运动无关,主要与沉积作用、成岩作用和溶蚀作用有关。在地层压力、脱水、干裂或重结晶作用下,黏土矿物脱水形成成岩收缩缝,通常规模较小,未贯穿页岩样品的观测视域范围,长100~500 μm,宽0.5~2 μm,平行于层面分布,缝面弯曲,形状不规则(图2(k))。成岩过程中,在溶蚀作用下易溶矿物颗粒中发育的微裂缝或

颗粒边缘常形成溶蚀缝(图 2(1)),形态多为蛇曲状和肠状,此类微缝在海相页岩中发育相对较少。

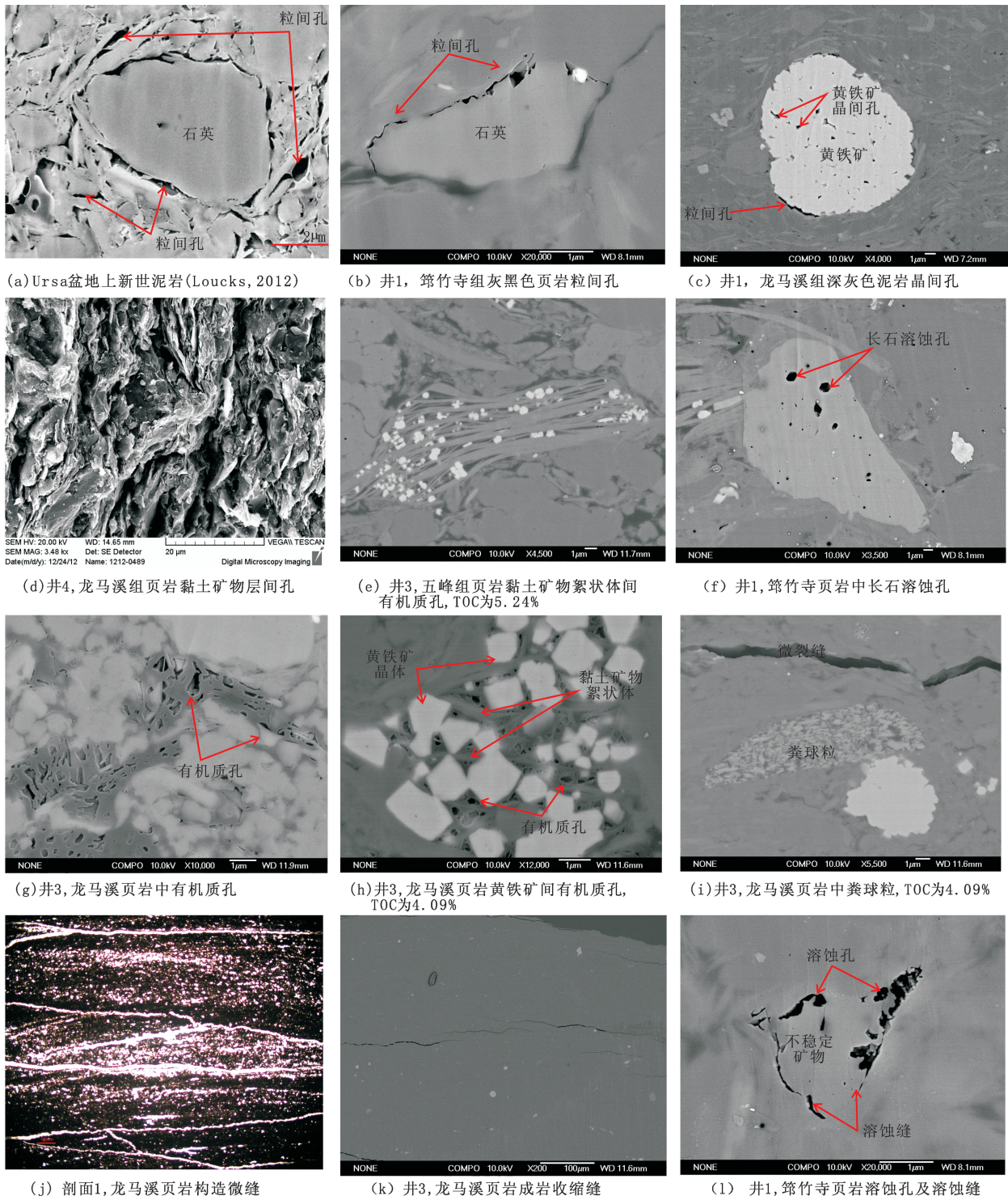


图 2 海相页岩微观储集空间类型
Fig.2 Microscopic space types of marine shale

3 孔隙发育影响因素

从下古生界 3 套页岩孔隙发育情况(表 2)来看,不同层位、同一地层不同层段孔隙发育特征不同。龙马溪组页岩主要以有机质孔、黏土矿物层间

孔为主,含少量的黄铁矿晶间孔及微裂缝;五峰组主要发育有机质孔和溶蚀孔、缝;九老洞组有机质孔极少,多见溶蚀孔、缝。造成孔隙分布差异的地质因素有原始沉积物的组成(矿物组成及有机质含量)、成岩演化差异。

表 2 下古生界页岩孔隙类型及相关地质参数统计(部分数据)

Table 2 Pore types and related geological parameters of Lower Paleozoic marine shale (partial data)

层位 编号	岩性	孔隙类型	矿物含量/%							TOC/%
			石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	黄铁矿	黏土矿物	
S ₁ l	1 灰绿色泥质页岩	黏土矿物层间孔、成岩收缩缝	29.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	70.7	0.14
	4 灰黑色钙质页岩	有机质孔、成岩收缩缝	18.1	0.0	1.9	16.1	30.4	1.9	31.6	2.84
	6 灰黑色粉砂质页岩	有机质孔、黏土矿物层间孔	26.1	1.3	6.5	8.9	5.9	1.8	49.5	1.41
	9 黑色页岩	有机质孔、黄铁矿晶间孔、黏土矿物层间孔	24.5	0.7	4.4	7.3	6.6	4.8	51.7	2.43
	10 黑色钙质页岩	有机质孔、黄铁矿晶间孔、黏土矿物层间孔	29.5	0.4	2.5	6.3	12.5	2.7	46.1	2.00
ε ₁ q	17 深灰色粉砂质页岩	构造微缝、溶蚀孔缝、黄铁矿晶间孔	42.0	0.0	21.0	1.7	3.2	2.0	28.0	0.34
	18 灰黑色粉砂质页岩	构造微缝、溶蚀孔、溶蚀缝	30.2	3.2	17.5	3.4	2.6	4.3	38.8	0.92
	23 黑灰色粉砂质页岩	构造微缝、溶蚀缝	35.0	2.2	20.6	0.6	0.0	4.4	37.2	1.15
	26 灰黑色页岩	构造微缝、成岩收缩缝、溶蚀缝	31.1	0.7	5.0	1.0	0.0	5.4	56.8	6.03

3.1 有机质孔发育程度与 TOC 成正比

在油气生成过程中,有机质缩合以及气体生成时体积膨胀,造成有机质中产生大量孔隙^[9-10]。有机质孔的发育程度通常与 TOC 和热演化程度有关,随热成熟度增加而增多^[11]。下古生界页岩处于高成熟演化阶段, R_o 一般为 2% ~ 3%,因此有机质含量是决定有机质孔发育的主要因素。

有机质孔只发育在 TOC 大于 0.5% 的页岩层中,在 TOC 小于 0.5% 的层段几乎不发育(表 2)。富有机质层段中有机质孔只发育在有机质内部,虽孔径较大(50 ~ 200 nm),但与外界不连通,孔隙多为孤立存在的,不能起到改善储集物性的作用。通过对不同 TOC 含量页岩孔隙度对比,孔隙度与有机质丰度并没有直接的相关关系(图 3),这与有机质孔之间相互连通性较差有关。需要指出的是,虽然下寒武统页岩具有较高的有机质含量,但有机质孔并不发育,其原因尚不明确,可能跟下寒武统页岩过高的成岩阶段有关。

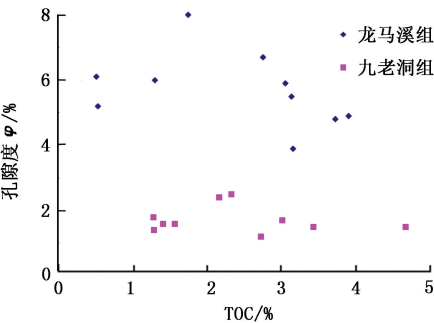


图 3 页岩样品 TOC 与孔隙度关系

Fig.3 Relationship of TOC and porosity of Lower Paleozoic marine shale

3.2 黏土矿物含量与孔隙发育呈正相关关系

一般情况下,黏土矿物含量相对高的页岩孔隙度大于黏土含量相对较低的页岩孔隙度(图 4,两个

异常点可能是由于样品脆性高,易形成微裂缝,影响了孔隙度测量的精度),这与黏土矿物中铝硅酸盐

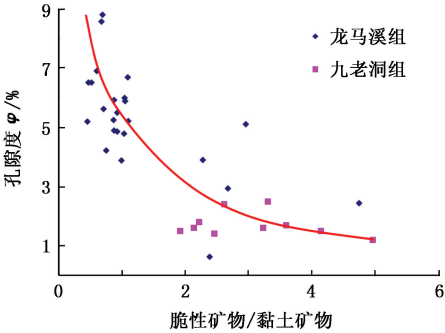


图 4 页岩孔隙度与脆性矿物/黏土矿物关系

Fig.4 Relationship of porosity and brittle mineral content/clay mineral content

的开放孔隙有关。黏土矿物对于孔隙的演化和保存具有重要作用,高岭石相对含量的变化与孔隙演化趋势一致,伊利石、绿泥石相对含量的变化与孔隙演化趋势相反^[12]。研究区龙马溪组底部伊利石和绿泥石含量显著减小,推测龙马溪组底部必然具有较高的孔隙率,能为页岩气的储存提供良好的场所^[13]。绿泥石和绿蒙混层组合形成的包膜或孔隙中充填绿泥石,可对孔隙起到明显的保护作用^[14]。龙马溪组的中部和上部绿泥石的含量较大,尽管其孔隙度可能不及底部大,但因普遍含有绿蒙混层而存在孔隙保护作用。同时,黏土矿物具有极大的比表面积和表面自由能,对于外来流体侵入地层后发生的敏感性物理或化学反应,在压裂开发阶段需要重视。总的来说,龙马溪组中黏土矿物对页岩气藏的形成和开发有积极意义,特别是底部低伊利石、绿泥石含量,高孔隙率层位应是页岩气勘探开发的重点层段。

3.3 孔隙形成与成岩演化作用有关

孔隙的形成与成岩演化作用密切相关(图 5,据

Loucks R G^[1], 修改), 在应力作用下, 孔喉的演化与孔隙的形态、尺寸有关^[15]。初始成岩阶段, 原始沉积物松散, 颗粒间孔隙最为发育。如 Ursa 盆地上新世弱固结泥岩^[1] (埋深 354 m), 石英颗粒间的孔隙直径可达 500 nm (图 2(a))。成岩作用早期随着埋深的增大, 松散沉积物固结成岩, 粒间孔逐渐减少。强烈压实作用下, 黏土矿物颗粒和有机质发生塑性变形充填到孔隙中, 使粒间孔减少, 甚至消失 (图 2(b)、(c))。片状的黏土矿物颗粒在压实作用过程中由于塑性变形, 会在脆性矿物颗粒边缘产生次生粒间孔。同时黏土矿物发生一系列成岩变化, 蒙脱石向伊利石 (或绿泥石) 的转化析出大量层间水。由于黏土矿物脱水作用, 形成大量黏土矿物层间孔和成岩收缩缝。有机质大量生排烃阶段 (油气生成窗), 有机质体积缩小以及气体生成时体积膨胀造成有机质中产生大量孔隙^[16], 同时在生烃的过程中产生大量的有机酸、CO₂ 和水^[17]。生烃过程中产生的有机酸使得易溶矿物颗粒 (如方解石、长石) 边缘或内部的微裂缝发生溶蚀, 形成溶蚀孔或溶蚀缝。同时, 黏土矿物脱水作用逐渐加强, 形成大量的黏土矿物层间孔和成岩收缩缝。

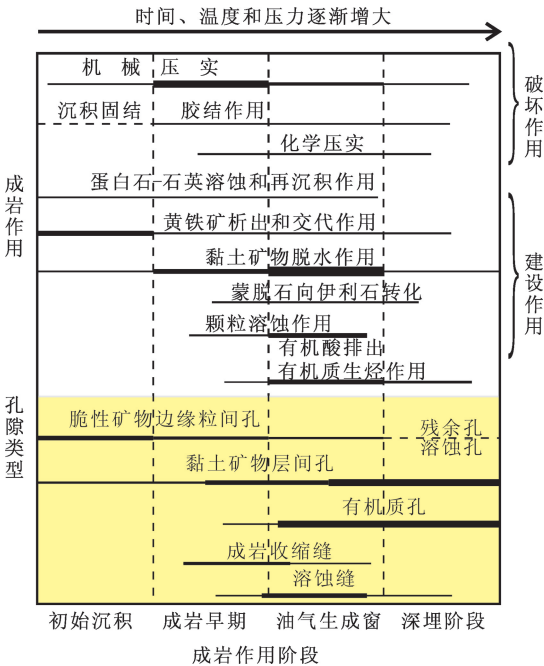


图 5 海相页岩中不同成岩阶段孔隙类型演化示意图

Fig. 5 Evolution of marine shale pore types in different diagenesis stages

4 孔隙分布定量表征

低温气体吸附法测试结果表明, 龙马溪组页岩

的比表面积分布在 3.017 ~ 30.055 m²/g, 平均为 14.726 m²/g; 孔隙直径为 2 ~ 100 nm 的孔隙体积为 4.460×10⁻³ ~ 3.039×10⁻² cm³/g, 平均 1.43×10⁻² cm³/g, 孔隙直径小于 2 nm 的孔隙体积为 0 ~ 7×10⁻³ cm³/g, 平均 2.4×10⁻³ cm³/g, 总孔容分布在 4.460×10⁻³ ~ 3.639×10⁻² cm³/g, 平均 1.67×10⁻² cm³/g。

页岩气储层中孔径多以纳米级计, 页岩储层孔隙度取决于孔径小于 10 μm 的中孔、微孔隙的发育程度^[3], 微孔 (10 ~ 250 μm) 的孔隙度随着砂质增加而增加, 随黏土和粉砂含量增加而减小^[18]; 中孔 (0.025 ~ 10 μm) 孔隙度随砂质和黏土增加而增加, 随砂质含量的增加而降低; 纳米 (2.5 ~ 25 nm) 孔隙度与颗粒之间缺少明显的相关性。微孔和甲烷吸附能力之间存在一定的正相关关系, 微孔主要分布在有机质中, 且随着成熟度增加而增加^[19]。龙马溪组页岩的微孔发育, 有利于页岩气的聚集, 同时形成大量的比表面积, 为页岩气的吸附提供大量储集空间, 是有利的页岩储层发育段。

5 结 论

(1) 下古生界海相页岩的微观储集空间类型分为矿物基质孔、有机孔和微裂缝 3 大类。龙马溪组和五峰组主要以有机质孔和黏土矿物层间孔为主, 九老洞组以构造微缝和溶蚀孔、缝为主。

(2) 孔隙形成与原始沉积物的组成 (矿物组成及有机质含量) 和成岩演化作用有关。有机质含量越高有机质孔越发育, 黏土矿物含量越高孔隙度越大, 有机质生烃和黏土矿物脱水作用是影响龙马溪组和五峰组页岩孔隙形成的主要成岩作用, 九老洞组页岩中孔隙形成与溶蚀作用有关。

(3) 龙马溪组页岩的比表面积分布在 3.017 ~ 30.055 m²/g, 平均为 14.726 m²/g; 总孔容分布在 4.460×10⁻³ ~ 3.639×10⁻² cm³/g, 平均为 1.67×10⁻² cm³/g, 是有利的页岩储层发育段。

参考文献:

[1] 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.

[2] JAVADPOUR F. Nanopores and apparent permeability of gas flow in mudrocks (shale and siltstone) [J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2009, 48(8): 16-21.

[3] BUSTIN A M M, BUSTIN R M, CUI X. Importance of fabric on the production of gas shales [R]. SPE 114167,

- 2008.
- [4] SLATT R M, NEAL R O'Brien. 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.
- [5] SLATT R M, ABOUSLEIMAN Y. Merging sequence stratigraphy and geomechanics for unconventional gas shales [J]. The Leading Edge, 2011, 30(3): 274-282.
- [6] SCHIEBER J, SOUTHARD J B. Bed-load transport of mud by floccules ripples: direct observation of ripple migration processes and other implications [J]. Geology, 2009(37): 483-486.
- [7] LOVE I G, AMSTUTZ G C. Review of microscopic pyrite from the Devonian Chattanooga shale and Rammelsberg Banderz [J]. Fortschritt Mineralogie, 1966, 43: 273-309.
- [8] RICHARD D T. The origin of framboids [J]. Lithos, 1970, 3(3): 269-293.
- [9] 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.
- [10] MODICA C J, LAPIERRE S G. Estimation of kerogen porosity in source rocks as a function of thermal transformation: example from the Mowry shale in the Powder River Basin of Wyoming [J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(1): 87-108.
- [11] LOUCKS R G, ROBERT M R, STEPHEN C R, 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.
- [12] 程晓玲. 黏土矿物转化与储层孔隙演化的规律性研究: 以苏北盆地台兴油田阜三段储层为例 [J]. 大庆石油地质与开发, 2006, 25(1): 43-45.
- CHENG Xiaoling. Laws of clay mineral transformation and reservoir porosity evolution: a case study of Fu III Member of Taixing Oil Field in Subei Basin [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2006, 25(1): 43-45.
- [13] 陈尚斌, 朱炎铭, 王红岩, 等. 四川盆地南缘下志留统龙马溪组页岩气储层矿物成分特征及意义 [J]. 石油学报, 2011, 32(5): 775-782.
- CHEN Shangbin, ZHU Yanming, WANG Hongyan, et al. Characteristics and significance of mineral compositions of Lower Silurian Longmaxi Formation shale gas reservoir in the southern margin of Sichuan Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(5): 775-782.
- [14] 朱平, 黄思静, 李德敏, 等. 黏土矿物绿泥石对碎屑储集岩孔隙的保护 [J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2004, 31(2): 153-156.
- ZHU Ping, HUANG Sijing, LI Demin, et al. Effect and protection of chlorite on clastic reservoir rocks [J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2004, 31(2): 153-156.
- [15] CUTRIS 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.
- [16] SCHIEBER J. Common themes in the formation and preservation of intrinsic porosity in shales and mudstones—illustrated with examples across the Phanerozoic [R]. SPE 132370, 2010.
- [17] 王行信, 周书欣. 泥岩成岩作用对砂岩储层胶结作用的影响 [J]. 石油学报, 1992, 13(4): 20-30.
- WANG Xingxin, ZHOU Shuxin. The effects of diagenesis of mud stone on the cementation of a sandstone reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 1992, 13(4): 20-30.
- [18] CONNELL M S, KATSUBE T J. Pore structure versus texture relationship of sediment samples from a research well in the Beaufort-Mackenzie Basin, northwest Territories [R]. Canada: Geological Survey of Canada, 2008.
- [19] CHALMERS G R, BUSTIN R M, POWER I M. A pore by any other name would be as small: the importance of meso- and microporosity in shale gas capacity [C]. AAPG Search and Discovery Article, 2009.

(编辑 徐会永)