DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2020.26.06.065

剪切作用对页岩有机质孔发育特征和吸附能力的影响

俞雨溪^{1,2,3}, 王宗秀^{1,2,3}, 冯兴强^{1,2,3}, 张凯逊^{1,2,3}, 张林炎^{1,2,3} YU Yuxi^{1,2,3}, WANG Zongxiu^{1,2,3}, FENG Xingqiang^{1,2,3}, ZHANG Kaixun^{1,2,3}, ZHANG Linyan^{1,2,3}

1. 中国地质科学院地质力学研究所,北京 100081;

2. 自然资源部古地磁与古构造重建重点实验室,北京 100081;

3. 中国地质调查局油气地质力学重点实验室,北京 100081

1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;

2. Key Laboratory of Paleomagnetism and Tectonic Reconstruction, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China;

3. Key Laboratory of Petroleum Geomechanics, China Geological Survey, Beijing 100081, China

YU Y X, WANG Z X, FENG X Q, et al., 2020. Effect of shear on the development and adsorption capacity of organic pores in shale [J]. Journal of Geomechanics, 26 (6): 830-839. DOI: 10.12090/j. issn. 1006-6616. 2020. 26. 06. 065

Abstract: Organic pore is the most important type of storage space for adsorbed gas and free gas in highly mature shale reservoirs. The marine shale formations in South China experienced complex structural deformations and the detachment structures widely developed. To investigate the effect of shear-induced deformation on the microscopic structure and adsorption capacity of organic pores in shale, the lower Cambrian Niutitang shales in the Sancha outcrop in Zhangjiajie were taken as an example. Based on scanning electron microscope observations and statistical parameter analysis of pore images, the development characteristics of organic pores from the detachment belt, the near-by detachment belt and the far-away detachment belt were compared. The methane isothermal adsorption tests were also carried out on the three types of samples. The results show that the pores developed within the organic matters have dominant pore sizes less than 20 nm and the organic matter-mineral related pores have larger pore sizes and mainly developed in the organic matter encapsulating mineral fragments in the detachment belt. The organic pores experienced directional elongation and flattening under shear. The adsorption capacity of shales decreased under shear and the degree of such influence gradually decreased as the distance from the detachment belt increased. The shear has an important controlling effect on shale storage and gas-bearing capacity, which is significant to the understandings on shale gas preservation conditions and accumulation patterns.

Key words: shale; detachment structure; organic pore; microscopic characteristics; pore structure; adsorption capacity

摘 要:有机质孔是高成熟页岩储层中吸附气和游离气赋存的主要储集空间类型。中国南方海相页岩地 层经历了多期构造改造,滑脱构造广泛发育。为了认识剪切作用对页岩有机质孔微观结构和吸附能力的 影响,以张家界三岔地区下寒武统牛蹄塘组页岩为例,通过大量扫描电镜图像观测统计,对比分析了滑 脱带页岩、邻近滑脱带页岩和远离滑脱带页岩有机质孔的发育特征,同时对这三类样品进行了甲烷等温 吸附测试。研究结果表明,有机质内孔发育在有机质内部,孔径一般<20 nm;位于有机质与矿物接触边 缘的复合孔孔径整体大于有机质内孔,主要发育在滑脱带页岩中包裹有矿物碎片的有机质中。受剪切作

- **第一作者简介:**俞雨溪(1987-),女,博士,从事页岩储层微观结构表征和页岩油气成藏机理研究。E-mail: yuyuxi718@126.com 通讯作者:王宗秀(1959-),男,博士,研究员,从事造山带、构造变形、区域地质研究工作。E-mail: wangzongxiu@sohu.com 收稿日期:2020-08-20;修回日期:2020-10-15;责任编辑:范二平
- **引用格式:** 俞雨溪, 王宗秀, 冯兴强, 等, 2020. 剪切作用对页岩有机质孔发育特征和吸附能力的影响 [J]. 地质力学学报, 26 (6): 830-839. DOI: 10.12090/j. issn. 1006-6616. 2020. 26. 06. 065

基金项目:国家自然科学基金 (41802178);中国地质科学院基本科研业务费项目 (JYYWF20181201);中国地质调查局地质调查项目 (DD20190085)

用影响,这两类有机质孔均沿一定优势方向发生形变,形态更趋于狭长且定向性增强;同时页岩甲烷吸 附能力变差,从滑脱带向远离滑脱带方向这种影响逐渐减弱。剪切作用对页岩储集性能和含气性具有重 要控制作用,对认识复杂构造区页岩气保存条件和富集规律具有重要意义。

关键词: 页岩; 滑脱构造; 有机质孔; 微观特征; 孔隙结构; 吸附能力

中图分类号: P618.13 文献标识码: A

0 引言

在北美和中国南方页岩气田中,高一过成熟 阶段的海相页岩均是最主要的页岩气产层之一 (Curtis, 2002;李建青等, 2014)。在该类型页岩储 层中,有机质孔是最主要孔隙类型和天然气赋存 空间,其发育特征直接影响了页岩储层的储集能 力(Loucks et al., 2009, 2012; Curtis et al., 2012; Milliken et al., 2013; Miao et al., 2018;张鹏等, 2019; Zhang et al., 2020)。因此,有机质孔发育 特征及其影响因素的研究一直是高一过成熟海相 页岩储层的研究重点。在构造稳定区页岩储层的 研究中,页岩热演化程度、有机质类型和有机质 含量等因素被认为是影响有机质孔发育的关键因 素(Cardott et al., 2015; Liu et al., 2017; Chen et al., 2019; Hu et al., 2020; Luo and Zhong, 2020)。

中国四川盆地和周边地区的高—过成熟海相 页岩均经历了多期复杂的构造活动,发育有大量 的变形构造(柏道远等,2009;杨鑫等,2011)。已 有研究表明,宏观和中观尺度的构造变形会影响 岩石的微观组构特征,发生一系列脆性、韧性变 形(王宗秀等,2012;Desbois et al.,2017;Liang et al.,2017;Ju et al.,2018),这势必会对有机质孔 的发育造成影响,从而导致页岩地层中气体赋存 状态和含气性发生变化(章新文等,2018;苗凤彬 等,2019)。因此,对中国南方复杂构造区页岩储 层有机质孔的研究需要考虑构造变形的影响,不 能简单的套用构造稳定区页岩的研究成果。

众多学者已开始关注构造变形对于有机质孔 的改造作用:Wang et al. (2017)通过扫描电镜观 察认为在韧性变形中有机质孔相比粒间孔能够在 变形中更好的被保存下来;Zhu et al. (2018, 2019)在研究断层和褶皱变形构造时提出脆性和 韧性变形均不利于页岩中有机质孔的保存;Ma et al. (2020)在研究重庆东北部褶皱变形带下寒武 统页岩时提出,中一大孔级别的有机质孔相对微 孔级别有机质孔更易发生变形。可见,目前的研 究主要集中于对构造变形下有机质孔的特征描述, 较少从成因机理上进行解释。且构造变形对有机 质孔发育的影响还远未达到共识。

因此,文中以湘西北地区寒武系牛蹄塘组页 岩为研究对象,针对野外剖面中最为常见的滑脱 构造,在扫描电镜微观图像参数观测统计的基础 上,对比分析了滑脱带、邻近滑脱带和远离滑脱 带页岩中有机质孔的发育特征,阐明了滑脱剪切 作用下有机质孔的变形规律,建立了构造作用下 有机质孔的变形模式;同时利用甲烷等温吸附实 验对这三类页岩的吸附能力进行了定量评价,认 识了剪切作用对有机质孔吸附能力的影响。研究 成果对认识构造改造控制的页岩储层的微观结构 变形机理和成藏模式具有重要启示。

1 地质背景

研究中选取有滑脱层发育的张家界三岔剖面为研 究对象,该剖面位于湖南省西北部的张家界地区(图 la),处于上扬子板块湘西北地区,邻近雪峰山隆起 带。晚三叠世晚期开始,受太平洋板块和印支板块向 扬子板块斜向俯冲影响,中、上扬子区广泛发育逆冲 褶皱冲断带,陆内递进变形由东向西扩展,发育多套 滑脱层(梅廉夫等,2010;汤良杰和崔敏,2011)。研 究区以挤压环境为主,属于盖层滑脱型(薄皮型), 滑脱面较发育(黄俨然等,2018)。湘西北地区牛蹄塘 组页岩在中寒武世中期开始生烃,在晚志留世初期开 始大量生气,侏罗纪末以来持续快速抬升并遭受了区 域滑脱作用改造(王阳等,2013)。三岔地区牛蹄塘组 以黑色泥质、炭质和硅质页岩为主,属于深水陆棚相 沉积,具有较好的生气条件(李苗春等,2012;肖正 辉等,2013;郭永岩等,2019)。

2 样品和测试方法

2.1 样品信息

牛蹄塘组三岔剖面露头中的滑脱带位于出露



2020

a—牛蹄塘组三岔剖面区域构造位置; b—页岩地层发育特征

图1 牛蹄塘组三岔剖面区域构造位置和页岩地层发育特征

Fig. 1 Regional structural location of the Sancha shale outcrop of the Niutitang Formation (Fig. 1a) and its characteristics (Fig. 1b)

剖面的底部,擦痕、镜面发育(图1b),由滑脱带向上页岩单层沉积厚度逐渐变大并发育有垂直节理。研究中分别对滑脱带、邻近滑脱带和远离滑脱带页岩新鲜面样品进行研究,制样过程中切除裂缝相关部分并选取页岩核心基质部位,每组样品TOC含量和矿物组成相近,具体样品信息见表1。

表 1	样品位置、	类型及其总有机碳含量和矿物组成

Table 1 Positions and types of samples and their TOC wt%											
	样号	样品类型	与滑脱带 顶面 距离/m	TOC/ %	石英/ %	粘土 矿物/ %	碳酸盐 矿物/ %	其他 矿物/ %			
	SC1	滑脱带	/	7.72	52	36	5	7			
	SC2	邻近滑脱带	0.4	7.05	54	28	8	10			
	SC3	远离滑脱带	1.5	8.29	50	30	15	5			

2.2 SEM 样品制备和观测

为了获得页岩有机质孔的形态学特征,研究 中使用场发射扫描电镜对离子抛光后的页岩样品 进行了观测。将页岩垂直层理的截面用 600 目 (23 μm)砂纸打磨,然后使用 Leica em tic3x 氩离 子抛光仪进行大面积抛光。为了防止镀金/碳堵塞 样品中微小孔隙,直接对未镀膜的离子抛光页岩 样品直接观测。观测用扫描电镜为蔡司场发射扫 描电镜(型号:SIGMA300),采用次级电子模式, 观测电压 5 kV。孔隙图像参数提取使用 Image-pro Plus 图像分析软件相关功能。参数包括孔隙直径、 长宽比和长轴方向。其中孔隙直径是指过孔隙质 心(Centroid)并与孔隙轮廓相交的线段长度的平 均值(图 2a)。孔隙长轴被定义为过孔隙质心并与 孔隙轮廓相交的最长线段,其长度被定义为孔隙 长度(如图 2b 中的 *d*_{major axis}),长轴方向被定义为 垂直轴顺时针旋转,首次与孔隙长轴重合所旋转 的角度(如图 2b 中的 angle *A*)。孔隙短轴被定义 为过孔隙质心并与孔隙轮廓相交的最短线段,其 长度被定义为孔隙宽度(*d*_{minor axis})。长宽比由孔隙 长度与宽度的比值计算。



图 2 孔径、长宽比、长轴方向参数的定义及测量 方法

Fig. 2 Definitions and measurement methods of parameters (pore size, LW ratio, major axis direction)

2.3 等温吸附测试

为了评价页岩样品的吸附能力,使用磁悬浮 天平高温高压等温吸附仪(型号: IsoSORP@ STATIC(SC-HP)),采用重量法获取页岩甲烷等 温吸附曲线。样品前处理温度 105 ℃,测试温度 30 ℃,最高压力 12 MPa。为了对镜下不可见的微 孔孔隙结构进行测定,采用 CO₂ 等温吸附测试, 实验温度为 0 ℃,压力范围 0~0.03 P/P_0 (P_0 为 相对饱和蒸汽压力),测试结果采用 NLDFT 模型解 释获得孔径范围在 0.38~2 nm 的微孔分布信息。

3 结果与讨论

3.1 页岩孔隙类型及其形态学特征

基于扫描电镜观察发现,露头中的牛蹄塘组页 岩发育有机质孔、粒(晶)间孔和粒(晶)内孔三 种孔隙类型。镜下观测结果表明,牛蹄塘组页岩的 粒间孔和粒内孔孔径较大,以孔径>100 nm的大孔 为主,主要为石英、粘土等矿物颗粒堆积形成的粒 间(内)孔等(图3a),有的粒间(内)孔孔径甚 至能达到微米级(图 3b),主要为溶蚀成因,很可能是在页岩露头风化过程中地层水淋滤形成的。

牛蹄塘组页岩中的纳米级孔隙主要为有机质 孔,文中根据有机质孔的产出位置进一步将其划 分为有机质内孔和有机质-矿物复合孔。其中,有 机质内孔发育在有机质内部,孔隙形态以海绵状 孔隙、圆形、椭圆形孔隙最为常见(图 3c、3d); 有机质-矿物复合孔是由有机质和无机矿物共同围 成的孔隙空间,发育在有机质与矿物的接触边缘, 在包裹有粘土、石英等矿物的有机质中最为常见, 形态以狭缝型、不规则多边形为主(图 3e)。有机 质-矿物复合孔在滑脱带样品中数量更多,尤其在 包含有角砾状矿物碎片的有机质中最为常见(图 3f)。有机质孔的孔径主要发育在100 nm 以下,以 有机质内孔数量占主体,其中有机质-矿物复合孔 的孔径整体大于有机质内孔的孔径。



a-c-SC3 样品; d、f-SC1 样品; e-SC2 样品

图 3 页岩孔隙类型扫描电镜图像

Fig. 3 SEM images of pore types in shale

基于扫描电镜图像,提取了样品中有机质孔 的形态学特征参数,包括有机质孔的孔径分布特 征、长宽比和长轴方向。通过对比上述有机质孔 形态学参数随距滑脱带的距离的变化,分析剪切 作用对于有机质孔变形产生的影响。

由表 2 结合图 4a 可以确定,有机质内孔的孔 径峰值均<20 nm,随着与滑脱带距离的减少,有 机质内孔孔径整体呈现出减小的趋势。由图 4b 发 现,SC1 样品的长宽比明显高于 SC2 和 SC3 样品, 滑脱变形会使有机质内孔趋向于具有更大的长宽 比(表 2)。进一步统计有机质内孔的长轴方向可 以发现(图 5a—5c),滑脱带内的 SC1 样品的有机 质孔具有明显的定向性,长轴方向主要分布在 20°~45°之间,随着与滑脱距离的增加,定向性逐 渐变差,SC3样品的有机质内孔已无明显的定 向性。

表 2 页岩有机质孔形态学参数统计结果

		有机质	向孔	有机质-矿物复合孔		
样号	样品类型	中值	中值	中值	中值	
		孔径/nm	长宽比	孔径/nm	长宽比	
SC1	滑脱带	14.2	1.92	23.0	2.38	
SC2	邻近滑脱带	16.5	1.79	20.1	2.11	
SC3	元宮滑脱帯	18 3	1 63	18 6	2 01	



a、b—有机质内孔; c、d—有机质-矿物复合孔

图 4 有机质孔孔径和长宽比参数统计结果

Fig. 4 Statistical results of pore size distribution (Fig. 3a and 3c) and LW ratio (Fig. 3b and 3d)

统计结果显示,有机质-矿物复合孔的孔径和 长宽比整体大于有机质内孔。非滑脱带样品 SC2 和 SC3 样品的孔径峰值在 20 nm 左右,SC1 滑脱带 样品中孔径>30 nm 的有机质-矿物复合孔数量占比 相比 SC2 和 SC3 明显增加,并且随着与滑脱带距 离的减少,有机质-矿物复合孔孔径表现出增大的 趋势(图 4c,表 2)。从孔径长宽比来看,滑脱变 形会使有机质-矿物复合孔趋向于具有更大的长宽 比(图 4d,表 2)。与有机质内孔相似,位于滑脱 带内的 SC1 样品具有定向展布的有机质-矿物复合 孔,存在两个近垂直的主要方向,分别是 30°~60° 和 135°~150°(图 5d—5f)。

3.2 页岩微孔孔体积

已有研究表明,海相页岩中的微孔主要是由 有机质贡献的,有机质微孔的体积决定了页岩的 吸附能力(Ross et al.,2009)。研究中进一步针对 镜下不可见的孔径<2 nm的微孔孔径分布特征进行 了定量测试分析,二氧化碳吸附测试结果显示 (图 6),滑脱带页岩和临近滑脱带页岩微孔孔体积 最小,分别为 0.0110 cm³/100 g和 0.0114 cm³/ 100 g,远离滑脱带页岩微孔孔体积相对较高为 0.1110 cm³/100 g。在有机质含量相近的情况下, 远离滑脱带页岩榉品微孔孔体积高出滑脱带和临 近滑脱带页岩微孔孔体积的一个数量级。可见, а

270

с

270

e





a-c-有机质内孔;d-f-有机质-矿物复合孔;a、d-SC1样品;b、e-SC2样品;c、f-SC3样品;水平方向为页岩层理方向图 5 有机质内孔和有机质-矿物复合孔孔隙长轴方向分布玫瑰花图

Fig. 5 Rose diagram showing the major axis directions of organic matter hosted pores (Fig. 4a, 4c and 4e) and organic matter-mineral related pores (Fig. 4b, 4d and 4f)



剪切作用对滑脱带内及其邻近地层页岩的孔隙结构,具有显著的改造作用。

3.3 页岩甲烷吸附特征

研究中对不同类型样品的吸附能力进行了甲 烷等温吸附测试并获得了等温吸附曲线(图7)。 测试结果表明,滑脱带页岩样品基本不具备吸附 能力、邻近滑脱带页岩吸附能力较弱,由于二者 吸附量过低,其吸附等温线无法用兰格缪尔方程 进行拟合,而远离滑脱带页岩的吸附能力较强, 等温吸附曲线符合兰格缪尔方程描述的吸附规律, 其兰氏体积为0.39 cm³/g,兰氏压力为3.62 MPa。 当地层压力为6 MPa时(常压条件下对应地下深 度 600 m),页岩的甲烷吸附量排序为:远离滑脱 带页岩>邻近滑脱带页岩>滑脱带页岩。可见,三 岔剖面的牛蹄塘组页岩的吸附能力具有从滑脱带 向远离滑脱带方向逐渐升高的趋势。



图 7 甲烷等温吸附测试结果 (30 ℃)

Fig. 7 Methane isothermal adsorption results at 30 °C

3.4 剪切作用下页岩有机质孔的变形模式及其对 吸附能力的影响

已有研究表明,在多套海相页岩地层中,有 机质孔是页岩气赋存的主要孔隙类型(周磊等, 2018)。页岩中能够吸附天然气的孔隙主要是微孔 级别的有机质孔(Ross and Bustin, 2009),因此有 机质孔是吸附气的主要赋存场所。对于高成熟海 相页岩来说,有机质孔的发育情况往往决定了页 岩储层的含气性。

在三岔剖面牛蹄塘组页岩中,中孔的孔隙类 型相对单一,主要为有机质孔;而大孔的孔隙类 型相对多样,除有机质-矿物复合孔外还包括粒间 (内)孔等无机质孔。镜下观测结果显示,有机质 内孔在剪切作用下发生了定向的拉伸压扁作用, 从而导致孔径减小、长宽比变大(图8),对孔径 <20 nm 中孔孔体积具有明显的减孔作用,并且从 滑脱带向远离滑脱带方向,这种改造作用逐渐减 弱(图4a);页岩中有机质与矿物的接触面是应力 薄弱面,在剪切作用下容易沿着该接触面开裂形成有机质-矿物复合孔,尤其在包裹有角砾状特征的矿物碎片的有机质中(图 3f),在剪切作用下刚性矿物容易旋转形成具有定向特征的狭缝型有机质-矿物复合孔(图 8),这些有机质-矿物复合孔的孔径相比有机质内孔整体较大,是页岩中孔径>30 nm的中—大孔的重要组成部分,因此剪切作用导致的有机质-矿物复合孔增加可能会造成对应孔径范围的中—大孔孔体积的增加并且从滑脱带向远离滑脱带方向,这种改造作用逐渐减弱(图 4c)。综上,剪切作用对有机质内孔具有减孔作用、对有机质-矿物复合孔具有增孔作用,同时会使有机质孔的定向性增强,有机质孔的变形程度随着距离滑脱带距离增加而减小。



a-变形前; b-剪切变形后

图 8 页岩有机质孔微观剪切变形模式

Fig. 8 Microscopic deformation pattern of shale organic pore under shear

页岩吸附能力受控于页岩有机质微孔(孔径 <2 nm)发育程度,有机质微孔孔体积越大、页岩 吸附能力越强(Mosher et al., 2013)。从甲烷等温 吸附测试结果看,三类页岩样品的有机质含量基 本相当(表 1),但吸附能力差异明显(图 7), CO₂等温吸附测试结果也反映出页岩微孔级别有机 质孔在剪切作用下发生了剧烈的减孔作用,并且 剪切作用对微孔级别有机质孔的改造随着与滑脱 带距离的增加逐渐减小(图 6)。受扫描电镜观测 精度限制,无法对微孔级别有机质孔进行观测和 参数统计。考虑到微孔级别有机质孔主要发育 在有机质内部(Ross and Bustin, 2009),这部分孔 隙在剪切作用下的变形机制可能与中孔级别的有 机质内孔相类似。

由于剪切作用对页岩有机质孔微观结构改造 具有双重影响,对应的剪切作用下页岩中的气体 赋存状态和含气性也会发生改变。在剪切作用控 制下,页岩中微孔含量的降低减少了吸附态气体 的赋存空间,页岩吸附态气体向游离态气体转化; 同时页岩孔径<20 nm 的中孔级别有机质内孔含量 降低,孔径>30 nm 的中一大孔级别有机质-矿物复 合孔含量增多,页岩整体孔径分布向大孔径方向 偏移,此时更有利于游离态页岩气的赋存。可见, 剪切作用通过改造页岩孔隙结构特征从而对页岩 气赋存相态和含气性产生影响。在后续研究中可 进一步针对滑脱变形层及其上覆和下伏页岩地层 的孔隙结构特征进行系统定量刻画,更深入认识 剪切作用对页岩储集性能和含气性的影响程度和 影响范围,从而为中国南方复杂构造区页岩气保 存条件和成藏机理研究提供基础。

4 结论

(1)张家界三岔剖面下寒武统牛蹄塘组页岩中的纳米级孔隙主要为有机质孔,根据孔隙在有机质中的产出位置可进一步划分为有机质内孔和有机质-矿物复合孔,有机质内孔的孔径整体小于有机质-矿物复合孔。

(2)不同类型的有机质孔受剪切作用影响的 变形特征不同。有机质内孔在剪切作用下发生定 向拉伸压扁,孔隙形态趋于狭长;剪切作用有利 于有机质-矿物复合孔的发育,在包裹有矿物碎片 的有机质中,有机质-矿物复合孔孔隙最为发育, 呈狭长型并具有定向性。

(3)在剪切作用下,页岩微孔级别有机质孔含量降低、页岩吸附甲烷的能力变差,孔径>30 nm的中一大孔级别的有机质-矿物复合孔含量增多,有利于吸附气向游离气转化。

(4)从滑脱带向远离滑脱带方向,剪切作用 对有机质孔的影响逐渐减弱,页岩吸附能力逐渐 增强。系统定量刻画剪切作用对页岩储集性能和 含气性的影响程度和范围对评价复杂构造区页岩 气保存条件具有重要意义。

References

- BAI D Y, NI Y J, LI S W, et al., 2009. A geometrical and kinematic analysis of the Early-Mesozoic Yueyang-Chibi fold-thrust belt in southern Jiangnan orogen [J]. Geology in China, 36 (5): 996-1009. (in Chinese with English abstract)
- CARDOTT B J, LANDIS C R, CURTIS M E, 2015. Post-oil solid bitumen network in the Woodford Shale, USA-A potential primary migration pathway [J]. International Journal of Coal Geology, 139:

106-113.

- CHEN Z Y, SONG Y, JIANG Z X, et al., 2019. Identification of organic matter components and organic pore characteristics of marine shale: A case study of Wufeng-Longmaxi shale in southern Sichuan Basin, China [J]. Marine and Petroleum Geology, 109: 56-69.
- CURTIS J B, 2002. Fractured shale-gas systems [J]. AAPG Bulletin, 86 (11): 1921-1938.
- CURTIS M E, CARDOTT B J, SONDERGELD C H, et al., 2012. Development of organic porosity in the Woodford Shale with increasing thermal maturity [J]. International Journal of Coal Geology, 103: 26-31.
- DESBOIS G, HÖHNE N, URAI J L, et al., 2017. Deformation in cemented mudrock (Callovo-Oxfordian Clay) by microcracking, granular flow and phyllosilicate plasticity: Insights from triaxial deformation, broad ion beam polishing and scanning electron microscopy [J]. Solid Earth, 8 (2): 291-305.
- GUO Y Y, LIANG M L, WANG Z X, et al., 2019. Organic geochemistry and mineral composition characteristics in shales of Niutitang Formation, Northwestern Hunan [J]. Journal of Geomechanics, 25 (3): 392-399. (in Chinese with English abstract)
- HU G, PANG Q, JIAO K, et al., 2020. Development of organic pores in the Longmaxi Formation overmature shales: Combined effects of thermal maturity and organic matter composition [J]. Marine and Petroleum Geology, 116: 104314.
- HUANG Y R, XIAO Z H, JIAO P, et al., 2018. Comparison of factors for shale gas accumulation in Niutitang formation wells in northwestern Hunan and its implications [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 49 (9): 2240-2248. (in Chinese with English abstract)
- JU Y W, SUN Y, TAN J Q, et al., 2018. The composition, pore structure characterization and deformation mechanism of coal-bearing shales from tectonically altered coalfields in eastern China [J]. Fuel, 234: 626-642.
- LI J Q, GAO Y Q, HUA C X, et al., 2014. Marine shale gas evaluation system of regional selection in South China: enlightenment from North American exploration experience [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 21 (4): 23-27, 32. (in Chinese)
- LI M C, DING H, JIAO K, et al., 2012. Organic petrology of Niutitang Formation in Sancha, western Hunan province, China [J]. Natural Gas Geoscience, 23 (6): 1077-1089. (in Chinese with English abstract)
- LIANG M L, WANG Z X, GAO L, et al., 2017. Evolution of pore structure in gas shale related to structural deformation [J]. Fuel, 197: 310-319.
- LIU B, SCHIEBER J, MASTALERZ M, 2017. Combined SEM and reflected light petrography of organic matter in the New Albany shale (Devonian-Mississippian) in the Illinois Basin: a perspective on organic pore development with thermal maturation [J]. International Journal of Coal Geology, 184: 57-72.
- LOUCKS R G, REED R M, RUPPEL S C, et al., 2009. Morphology, genesis, and distribution of nanometer-scale pores in siliceous

mudstones of the Mississippian Barnett shale [J]. Journal Sediment Research, 79 (12): 848-861.

- LOUCKS R G, REED R M, RUPPEL S C, et al., 2012. Spectrum of pore types and networks in mudrocks and a descriptive classification for matrix-related mudrock pores [J]. AAPG Bulletin, 96 (6): 1071-1098.
- LUO P, ZHONG N N, 2020. The role of residual bitumen on the pore structure of organic-rich shales from low to over mature: Insight from shale and coal samples after the hydrous pyrolysis [J]. International Journal of Coal Geology, 226: 103515.
- MA Y, ARDAKANI O H, ZHONG N N, et al., 2020. Possible pore structure deformation effects on the shale gas enrichment: An example from the Lower Cambrian shales of the Eastern Upper Yangtze Platform, South China [J]. International Journal of Coal Geology, 217: 103349.
- MEI L F, LIU Z Q, TANG J G, et al., 2010. Mesozoic intra-continental progressive deformation in Western Hunan-Hubei-Eastern Sichuan Provinces of China: Evidence from apatite fission track and balanced cross-section [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 35 (2): 161-174. (in Chinese with English abstract)
- MIAO F B, PENG Z Q, WANG C S, et al., 2019. Gas-Bearing Capacity and Controlling Factors of Niutitang Formation Shale in Well XZD-1, Western Margin of Xuefeng Uplift [J]. Earth Science, 44 (11): 3662-3677. (in Chinese with English abstract)
- MIAO Y N, LI X F, LEE J, et al., 2018. Characterization of hydrocarbon/pores generation and methane adsorption in shale organic matter [J]. Petroleum Science and Technology, 36 (15): 1187-1193.
- MILLIKEN K L, RUDNICKI M, AWWULLER D N, et al., 2013. Organic matter-hosted pore system, Marcellus formation (Devonian), Pennsylvania [J]. AAPG Bulletin, 97 (2): 177-200.
- MOSHER K, HE J J, LIU Y Y, et al., 2013. Molecular simulation of methane adsorption in micro- and mesoporous carbons with applications to coal and gas shale systems [J]. International Journal of Coal Geology, 109-110: 36-44.
- ROSS D J K, BUSTIN R M, 2009. The importance of shale composition and pore structure upon gas storage potential of shale gas reservoirs [J]. Marine and Petroleum Geology, 26 (6): 916-927.
- TANG L J, CUI M, 2011. Key tectonic changes, deformation styles and hydrocarbon preservations in Middle-Upper Yangtze region [J]. Petroleum Geology & Experiment, 33 (1): 12-16. (in Chinese with English abstract)
- WANG A M, CAO D Y, LI J, et al., 2017. A new discovery on the deformation behavior of shale gas reservoirs affecting pore morphology in the Juhugeng Coal Mining Area of Qinghai province, Northwest China [J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 91 (5): 1932-1933.
- WANG Y, ZHU Y M, CHEN S B, et al., 2013. Formation conditions of shale gas in Lower Cambrian Niutitang Formation, Northwestern Hunan [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 42 (4): 586-594. (in Chinese with English abstract)
- WANG Z X, ZHANG J, GUAN H M, et al., 2012. A discussion on the

structural deformation and oil/gas traps on the western side of the Xuefeng mountain [J]. Geological Bulletin of China, 31 (11): 1812-1825. (in Chinese with English abstract)

- XIAO Z H, WANG C H, YANG R F, et al., 2013. Reservoir conditions of shale gas in the Lower Cambrian Niutitang Formation, Northwestern Hunan [J]. Acta Geologica Sinica, 87 (10): 1612-1623. (in Chinese with English abstract)
- YANG X, LIU X W, WANG Y D, et al., 2011. The tectonic controls on the distribution of marine oil and gas in the adjacent areas of Xuefeng Mountain [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 33 (4): 7-12. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG P, HUANG Y Q, ZHANG J C, et al., 2019. Fractal characteristics of pore in marine shale and marine-continental transitional shale in northwest Guizhou [J]. Geology and Exploration, 55 (4): 1073-1081. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG W T, HU W X, BORJIGIN T, et al., 2020. Pore characteristics of different organic matter in black shale: A case study of the Wufeng-Longmaxi Formation in the Southeast Sichuan Basin, China [J]. Marine and Petroleum Geology, 111: 33-43.
- ZHANG X W, LI J J, LU S F, et al., 2018. Effects of structural deformation on shale pore structure and adsorption [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 25 (3): 32-36. (in Chinese with English abstract)
- ZHOU L, WANG Z X, LI H J, et al., 2018. Accumulation pattern of organic matter in shales of the Lower Cambrian Niutitang Formation, Chuandong-Wulingshan area [J]. Journal of Geomechanics, 24 (5): 617-626. (in Chinese with English abstract)
- ZHU H J, JU Y W, QI Y, et al., 2018. Impact of tectonism on pore type and pore structure evolution in organic-rich shale: Implications for gas storage and migration pathways in naturally deformed rocks [J]. Fuel, 228: 272-289.
- ZHU H J, JU Y W, HUANG C, et al., 2019. Pore structure variations across structural deformation of Silurian Longmaxi Shale: An example from the Chuandong Thrust-Fold Belt [J]. Fuel, 241: 914-932.

附中文参考文献

- 柏道远, 倪艳军, 李送文, 等, 2009. 江南造山带北部早中生代岳阳 一赤壁断褶带构造特征及变形机制研究 [J]. 中国地质, 36 (5): 996-1009.
- 郭永岩,梁明亮,王宗秀,等,2019.湘西北地区下寒武统牛蹄塘组 页岩有机地球化学与矿物组成特征 [J].地质力学学报,25 (3):392-399.
- 黄俨然,肖正辉,焦鹏,等,2018. 湘西北牛蹄塘组探井页岩气富集 要素的对比和启示 [J]. 中南大学学报(自然科学版),49 (9):2240-2248.
- 李健青,高玉巧,花彩霞,等,2014. 北美页岩气勘探经验对建立中 国南方海相页岩气选区评价体系的启示 [J]. 油气地质与采收 率,21 (4):23-27,32.
- 李苗春,丁海,焦堃,等,2012. 湘西三岔地区牛蹄塘组黑色岩系有 机岩石学特征 [J].天然气地球科学,23 (6):1077-1089.
- 梅廉夫,刘昭茜,汤济广,等,2010. 湘鄂西—川东中生代陆内递进 扩展变形:来自裂变径迹和平衡剖面的证据 [J]. 地球科学一中

国地质大学学报, 35 (2): 161-174.

- 苗凤彬,彭中勤,王传尚,等,2019. 雪峰隆起西缘湘张地1井牛蹄 塘组页岩含气性特征及控制因素 [J].地球科学,44 (11): 3662-3677.
- 汤良杰,崔敏,2011.中上扬子区关键构造变革期、构造变形样式 与油气保存 [J].石油实验地质,33 (1):12-16.
- 王阳,朱炎铭,陈尚斌,等,2013. 湘西北下寒武统牛蹄塘组页岩气 形成条件分析 [J]. 中国矿业大学学报,42 (4):586-594.
- 王宗秀,张进,关会梅,等,2012. 雪峰山西侧地区构造形变与油气 圈闭 [J]. 地质通报,31 (11):1812-1825.

肖正辉,王朝晖,杨荣丰,等,2013.湘西北下寒武统牛蹄塘组页岩

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID): 可扫码直接下载文章电子版,也有可能听到作者的 语音介绍及更多文章相关资讯 气储集条件研究 [J]. 地质学报, 87 (10): 1612-1623.

- 杨鑫,刘兴旺,王亚东,等,2011. 构造活动对雪峰山邻区海相油气 分布的控制 [J]. 西南石油大学学报 (自然科学版),33 (4): 7-12.
- 张鹏,黄宇琪,张金川,等,2019. 黔西北海相、海陆过渡相页岩孔 隙分形特征对比研究 [J]. 地质与勘探,55 (4):1073-1081.
- 章新文,李吉君,卢双舫,等,2018.构造变形对页岩孔隙结构及吸 附性的影响 [J].特种油气藏,25 (3):32-36.
- 周磊, 王宗秀, 李会军, 等, 2018. 川东一武陵山地区下寒武统牛蹄 塘组页岩有机质富集模式 [J]. 地质力学学报, 2018, 24 (5): 617-626.

