

页岩有机质特征对有机孔发育及储层的影响

曹涛涛^{1,2} 宋之光³

1. 中国石化石油勘探开发研究院, 江苏 无锡 214126;
2. 南京大学, 江苏 南京 210093;
3. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东 广州 510640)

摘要: 已有的勘探证实有机孔是页岩主要的储集空间, 研究有机孔的发育特征及影响因素是页岩气勘探的重要内容。通过对相关文献进行系统分析, 探讨了有机孔演化的过程及控制因素, 并进一步总结了有机质对页岩储层的溶蚀性、含水性、脆性的影响。研究表明: 有机孔的发育是高成熟度、较好类型的有机质和易生烃的显微组分共同作用的结果; 已形成的有机孔受压实、过成熟碳化以及基质沥青充填等作用的破坏, 不利于有机孔的保存; 有机质对页岩储层的改造体现在有机质热演化过程中产生的酸性流体溶蚀长石、白云石等矿物形成溶蚀孔, 有机孔吸纳水分降低吸附能力, 以及高有机质含量造成页岩韧性增强不利于压裂改造等方面。提出了研究方向: 根据中国复杂的陆相、海陆过渡相、海相页岩气储层及成藏条件的差异, 在今后的研究中应加强不同沉积相页岩有机质类型和显微组成的研究, 分析其对有机孔发育的影响, 定量研究有机孔对页岩储集物性的贡献, 以及明确有机孔的主要赋存载体。

关键词: 页岩储层; 有机孔; 有机质特征; 溶蚀作用; 脆性指数

中图分类号: TE122.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6535(2016)04-0007-07

0 引言

近年来, 国内外学者对页岩的孔隙结构及含气性进行了大量的研究工作, 认识到页岩中的孔隙类型繁多, 既包含基质裂缝、矿物晶间孔和粒内孔等原生孔隙, 也包含有机孔、溶蚀孔和有机质边缘微裂缝等次生孔隙^[1-3]。随着页岩孔隙结构研究程度的不断深入, 已经证实了有机孔是大部分高过成熟页岩中的优势孔隙类型。国内外学者对页岩有机孔的发育及其对甲烷吸附的影响做了大量的研究工作^[4-5], 认为 TOC 含量是页岩有机孔发育最重要的控制因素, 其次是有机质类型、成熟度和基质沥青含量等, 但这些因素会因地质时代和沉积环境不同而有较大的差异。所以在页岩气勘探过程中, 要重点关注有机质自身属性(含量、类型、成熟度、显微组成和基质沥青等)对页岩储集性能的影响, 同时由于有机质也会对页岩储层的次生孔隙、含水

能力和脆性特征有一定的影响, 在页岩气勘探和开采过程中进行压裂时应对此给予足够的重视。

在大量调研前人研究成果的基础上, 对以下问题进行了探讨: ① 有机孔随成熟度的变化以及在过成熟阶段的保存与破坏; ② 相同成熟度条件下, 有机孔发育呈现迥异的现象^[6]; ③ 基质沥青对孔隙系统的堵塞和影响; ④ 有机质热演化过程中产生的酸性流体对不同类型页岩储层的改造以及有机质对含水性的影响; ⑤ 有机质含量对页岩脆性的影响。

1 有机孔的形成

并不是所有页岩中的有机质都会发育孔隙, 其形成存在 2 个主要控制因素^[7-8]。首先受控于有机质的显微组分, 有些显微组分在热演化过程中会生成烃类并从有机质中排出从而产生大量的孔隙, 而有些显微组分在热解过程中不生烃, 故不能形成

收稿日期: 20151212; 改回日期: 20160519

基金项目: 国家“973”项目“中国南方古生界页岩气赋存机理和资源潜力评价”04 课题“深层页岩气储集物性及含气性研究”(2012CB214704); 国家自然科学基金“我国南方古生界高过成熟页岩吸附特征与页岩含气性评价”(41273058); 国家油气重大专项“深层高成熟烃源岩的容与排烃评价”(2011ZX05008-002-20)

作者简介: 曹涛涛(1987-) 男, 工程师, 2009年毕业于兰州大学地质学专业, 2014年毕业于广州地球化学研究所地球化学专业, 获博士学位, 现主要从事页岩气储集物性及含气性研究。

孔隙;其次受控于成熟度,随着成熟度的增加,早期生成的烃类可能在干酪根内发生溶胀,堵塞有机孔,进入生烃中后期以后,油和干酪根或焦沥青的裂解会产生大量孔隙,甚至有学者将有机孔分为干酪根孔和焦沥青孔^[1,8-10]。有机孔的形成和保留(或破坏)机制与其本身特征密切相关,最终能够发育的有机孔的数量多少及孔径大小不仅与成熟度和显微组分密切相关,还受有机质含量、类型及基质沥青等因素的影响。

2 有机孔发育的影响因素

2.1 TOC 含量

一般认为 TOC 含量是有机孔数量和孔隙体积的主要影响因素,TOC 含量越高,就越能够增加页岩的储集能力。但也存在成熟阶段的页岩孔隙度随着 TOC 含量的增加表现出先增加后略微降低甚至直接呈现出负相关的现象^[11-16]。Milliken 等^[11]在研究 Marcellus 页岩时,发现当 TOC<5.6%时,孔隙度呈现出随 TOC 含量增加而增加的现象,而当 TOC>5.6%时,孔隙度则与 TOC 之间存在一定的负相关性。涪陵地区 JY1 井龙马溪组页岩和贵州铜仁 ZK601 井牛蹄塘组页岩的有机孔发育特征显示,随 TOC 含量的增加,龙马溪组有机孔的尺寸逐渐变小,而牛蹄塘组页岩在 TOC 含量低于 5.0%时,会有较多的有机孔发育,而 TOC 含量高于 6.0%时,有机孔发育很少。

高 TOC 含量对有机孔的抑制可能是机械压实作用或有机质中包含更多不生烃的显微组成引起的,或者是二者共同引起。①高 TOC 页岩具有更强的韧性特征,在地层条件下更易受压实作用的影响,从而导致页岩中部分无机矿物孔和有机孔被压缩闭合;低 TOC 页岩中的有机孔在刚性矿物格架保护下不易被压实闭合从而可能具有较高的孔隙度^[11]。黄仁春等^[17]观察到 JY1 井龙马溪组片状有机孔呈长条形,多平行于层面或刚性矿物颗粒边缘,具有明显的被压扁特征;而一些刚性矿物颗粒三角地带的有机孔发育很好,呈现出圆形或椭圆形,这些孔隙受压实作用影响较小,孔隙形态保留较好。富黏土矿物页岩中有机孔明显低于富方解石和硅质矿物的页岩,原因在于前者更易受压实造成有机孔的压缩破坏。②高 TOC 含量中可能包含

更多不生烃的显微组分,造成有机质颗粒边缘孔的发育情况比内部好,详细讨论见 2.4 节。

2.2 成熟度

Curtis 等^[6,18-19]研究发现,有机质成熟度 R_o 低于 0.90% 时有机孔不发育,进入生气窗以后液态烃开始裂解,有机孔开始发育,孔体积开始增加。针对有机孔发育的成熟度下限的研究已经很多,如 Reed 等^[10]认为 Barnett 和 Haynesville 页岩中有机孔形成始于 $R_o = 0.80%$,而 Loucks 等^[9]和 Slatt 等^[20]则认为 $R_o = 0.60%$ 时已经开始发育有机孔。但针对有机孔保存与破坏的成熟度上限的研究还较少,邹才能等^[3]和王道富等^[21]认为, R_o 超过 3.60% 以后有机质发生碳化,内部孔隙被部分破坏甚至完全破坏,由半规则—规则的孔隙形态演变成纤维状或被压实成条状,造成有机孔的体积大幅度减少。 R_o 在 3.60% 时有机质具有最高的孔体积,约占有机质体积的 35.0%;随着成熟度持续增加到 6.36%,有机质中孔隙体积降到 5.0% 左右。极高的成熟度既严重破坏了有机孔的结构,又会造成气体的逸失,不利于页岩气的富集成藏。

综上所述可以看出,有机孔的演化与成熟度之间的关系可以分为 3 个阶段,即形成期($0.60% < R_o \leq 2.00%$)、发展期($2.00% < R_o \leq 3.50%$)和转换破坏期($R_o > 3.50%$)^[22-23]。 $R_o < 2.00%$ 时,有机质处于低成熟—成熟阶段,微孔和介孔的体积都较小,且随着成熟度的增加增幅不大; $R_o > 2.00%$ 以后,有机质处于高成熟演化阶段,微孔和介孔的体积开始快速增加且在 $R_o = 3.50%$ 左右达到孔体积峰值; $R_o > 3.50%$ 以后,有机质处于过成熟演化阶段,有机质发生碳化,孔隙遭受破坏,数量变少,结构变差,孔体积和比表面积明显下降。

2.3 有机质类型

Chalmers 等^[4]认为, I 型和 II 型干酪根比 III 型干酪根更容易裂解生烃和产生有机孔,这与 III 型干酪根转化为油气的能力远低于 I 型和 II 型有关。美国主要含气页岩与中国上扬子地区古生界页岩有机质以生油型或偏生油型的 I 型和 II 型为主^[24],有机孔一般发育较好。Cao 等^[25]研究发现高过成熟的 I 型和 II 型干酪根中孔隙发育较好,其

比表面积分别高达 $161.23 \text{ m}^2/\text{g}$ 和 $279.84 \sim 300.30 \text{ m}^2/\text{g}$, 远高于黏土矿物, 以Ⅲ型干酪根为主的煤所具有的有机孔很少, 比表面积只有 $5.30 \text{ m}^2/\text{g}$ (TOC 含量为 59.2%)^[26]。王中鹏等^[27]对贵州毕节龙潭组、袁野等^[28]对中国鄂尔多斯盆地山西组Ⅲ型有机质页岩研究显示, 其主要的储集空间是矿物晶间孔、灰岩以及砂岩夹层中的剪切裂缝, 有机孔整体上发育少, 说明Ⅲ型干酪根不利于有机孔的发育。

干酪根中孔隙发育程度也可以通过甲烷吸附含量的高低反映出来。干酪根对气体的吸附能力由强到弱的顺序依次是Ⅲ型、Ⅱ型、Ⅰ型^[29]。以Ⅲ型干酪根为主的煤样具有更高的甲烷吸附能力, 这与前人研究的煤的比表面积较低相悖, 可能的原因是煤对甲烷分子的吸附是以“笼形化合物”或填充的方式存在于煤层中而不是简单的单层或多层吸附^[30-31], 因而表现出比Ⅰ型和Ⅱ型干酪根更高的甲烷吸附量。Ⅰ型和Ⅱ型干酪根具有非常发育的有机孔, 其气体赋存形式也与煤样具有明显不同, 也更容易形成页岩气藏, 说明Ⅲ型干酪根中孔隙不发育可能是制约海陆过渡相页岩气藏形成的重要因素。

2.4 显微组分

同一块页岩中相邻的2块有机质甚至是同一块有机质的不同部位, 孔隙发育情况差异很大^[14, 32]。说明具有相同热史的有机质, 有机孔的发育不仅与成熟度有关, 同时还会受显微组成的影响。多孔的有机质主要存在于晶粒间和颗粒接触区域, 具有较好的可流动性及可热解性; 而无孔的有机质往往是以较大的片状或块状存在^[33-34], 这可能与较大片状有机质中包含更多的情性组分有关。

腐泥组是孔隙发育的有利组成, 最容易形成孔隙; 镜质体生烃能力强, 在热演化过程中产生的异常压力使有机质发生破裂而形成孔隙^[35], 如基质镜质体会发育微孔和中孔, 残留的植物组织丝质体胞腔发育大孔^[36]; 惰质组在热演化过程中基本不生排烃, 因而没有孔隙的形成与发育。Chalmers等^[4]发现尽管加拿大哥伦比亚下白垩统 Hulcross 组页岩具有很高的 TOC 含量, 但由于缺少镜质体, 致使甲烷吸附量较低; Bustin 等^[37]也证实了同阶

煤的吸附能力随着惰质组含量的增加而降低, 随着镜质组含量的增加而增加。尽管不同显微组分的孔隙发育差异很大, 但 Bernard 等^[38]从有机质残留物角度出发, 认为页岩中发育有机孔的主体是焦沥青而非干酪根, 这点需要做进一步的研究工作。

Tian 等^[12]研究发现龙马溪组和牛蹄塘组有机孔分别占有有机质的 36.00% 和 10.00% 左右, 而马勇等^[39]分析龙马溪组有机质孔隙度为 $9.13\% \sim 18.42\%$, 牛蹄塘组有机质中孔隙体积小于 1.59% , 都表现出龙马溪组有机孔数量和体积远高于牛蹄塘组。对牛蹄塘组有机孔发育差的机理目前尚没有合理的解释以及更深入的研究, 分析其可能与有机质来源于褐藻、红藻、高肌虫、大型蠕虫和虫管生物等有关, 在热演化过程中高肌虫和大型蠕虫多转化为有机硅, 不利于孔隙发育, 而龙马溪组的有机质显微组分来源以红藻为主^[40], 是有机孔发育的重要组成。

2.5 基质沥青

页岩孔隙度随基质沥青含量的增加呈现明显的指数性下降趋势^[41], 说明基质沥青可能充填占据一部分孔隙空间从而显著降低页岩的孔隙度^[41-42]。Mastalerz 等^[42-45]研究了 New Albany 不同成熟度页岩 (R_o 为 $0.35\% \sim 1.41\%$), 发现在成熟阶段后期页岩的总孔隙度和孔体积呈现出明显降低的现象, 主要原因是由于生油期间富脂肪烃和富氧的沥青生成之后被压入到基质孔隙和微裂缝中及充填在有机孔中, 表现出微孔和中孔的体积在生油窗范围内最低; 在生油期之后, 有机质开始芳构化脱甲基、脱氧, 微孔和中孔的体积又开始增加, 一直增加到 R_o 为 3.50% 左右。因而, 生油型干酪根在早期生烃过程中产生的富脂肪基质沥青会导致有机孔、晶间孔及微裂缝被充填, 孔隙度下降到低值; 相反, 生气型干酪根只能生成相对少量的基质沥青, 对页岩孔隙度的影响较小。而一旦进入成熟后期, 基质沥青裂解会释放出大量被占据的有机孔从而增加有机孔体积, 这也从侧面证实了Ⅰ型和Ⅱ型干酪根在高过成熟阶段具有更丰富的有机孔。

尽管基质沥青的充填能够降低页岩的孔隙度, 但也能够溶解一定量的甲烷气体, 使甲烷气体在高压状态下具有较高的溶解气含量^[46-47]。由于这部分溶解气不能被有效开采, 对页岩气商业化生产作

用很小,因此,常忽略这部分溶解气的存在。但是,基质沥青在页岩中充填了大量的孔隙空间,在分析页岩储集物性时,其含量的高低应作为一个重要的制约因素被考虑在内。

3 有机质对储层的影响

3.1 有机酸对储层的溶蚀

生烃过程控制着有机孔的发育和有机酸作用下溶蚀孔的形成。在中成岩阶段,有机质达到生烃门限,发生脱羧基作用产生 CO_2 和 H_2S , CO_2 和 H_2S 溶于水后形成酸性流体,使碳酸盐岩和长石等易溶矿物产生大量的溶蚀孔;在晚成岩阶段,页岩储层受压实作用造成孔隙减少,连通性和渗透性变差,流体交换不畅,使溶蚀作用在很大程度上受到了抑制^[48]。因此,溶蚀孔的形成主要发生在有机质生烃阶段,而后期的再埋深和再压实作用会造成溶蚀孔一定程度上的减少^[49-51]。北美 Fort Worth 盆地低成熟页岩中钙质颗粒中溶蚀孔发育很少或未发育,但在高成熟度页岩中钙质颗粒中则会发育大量的亚椭圆形或矩形的溶蚀孔,孔隙体积占钙质颗粒体积的 20% 左右^[52]。Barnett 盆地贫黏土矿物的页岩中钙质的粒内孔可占总孔隙的 20.15%,可能的原因是钙质碳酸盐岩粒内孔主要是由有机酸流体溶蚀而形成的^[53]。页岩中溶蚀孔一般尺寸较大,是游离气良好的储集场所,可作为重要的储集空间,在非常规页岩储层研究中应受到关注。

3.2 对储层水含量的影响

多数学者都认为页岩中的水分随黏土矿物含量增加而增加,水分的存在能够显著降低黏土矿物对甲烷气体的吸附能力。有机质一般被认为具有亲油气性和疏水性,水分子不容易进入有机孔内。大量文献研究表明,随着水含量的增加,煤对甲烷的吸附量降低至一个临界点,之后,水含量再增加,甲烷吸附量不再降低^[54-55]。在水平衡条件下,煤的吸附能力会降低 60%~90%。与煤不同,页岩的黏土矿物含量很高,水分子通过占据黏土矿物的孔隙喉道阻碍甲烷分子进入孔隙系统中来降低甲烷吸附容量。但 Ross^[47] 等研究表明,北美泥盆—密西西比系和侏罗系页岩的甲烷吸附量在水平衡情况下比干燥时分别降低了 58.3% 和 71.5%,这与

前人研究认为的黏土矿物是页岩中水赋存的主要载体相矛盾,说明水可能进入了有机孔中。据此,总结了 Chalmers 等^[4] 的研究成果,发现页岩的比表面积与水含量之间呈明显的负相关性,但同时随着水含量的增加,甲烷吸附量也会同步增加。表明水可能有很大一部分存在于有机孔中,水分子与甲烷分子在有机孔中形成同步吸附和竞争吸附,因而有机孔的发育可能会为页岩储层储集一部分水。尽管如此,关于水在页岩中的赋存方式仍然存在很大的争议,目前尚未有统一的认识。

3.3 对储层脆性的影响

脆性指数是决定页岩储层能否实施压裂改造的主要技术指标^[56-57],通过压裂改造产生的人工裂缝能够连通页岩中孤立的孔隙储集单元,使气体得到释放,获得可观的产气量。北美页岩脆性一般采用如下评价指标:

$$BI1 = w_{Qz} / (w_{Qz} + w_{Ca} + w_{Dol} + w_{Cly}) \times 100\% \quad (1)$$

式中: $BI1$ 为脆性指数 1, %; w_{Qz} 为石英质量分数; w_{Ca} 为方解石质量分数; w_{Dol} 为白云石质量分数; w_{Cly} 为黏土矿物质量分数。

由于中国扬子地区古生界页岩中矿物组成复杂,除石英、方解石外还包含较多的长石等脆性矿物,基于这种情况,陈吉等^[58] 对脆性指数 1 进行了修正,并得出脆性指数 2:

$$BI2 = (w_{Qz} + w_{Ca} + w_{Dol}) / (w_{Qz} + w_{Fsp} + w_{Ca} + w_{Dol} + w_{Cly}) \times 100\% \quad (2)$$

式中: $BI2$ 为脆性指数 2, %; w_{Fsp} 为长石质量分数。

然而,对于中国海陆过渡相页岩而言, TOC 含量通常较高, TOC 质量分数甚至会达到 20% 以上,换算成体积分数达到 40% 以上。由于有机质本身具有很强的韧性,特别是很高含量的有机质会显著地增强页岩的韧性,降低页岩的脆性。在以往脆性评价时很少把 TOC 含量考虑在内,也未考虑到页岩的压裂易受地层厚度、有效应力和成岩作用的影响。因此,在综合评价脆性指数时,须将这些因素考虑在内,建立新的评价指标 3:

$$BI3 = (w_{Qz} + w_{Fsp} + w_{Ca} + w_{Dol}) / (\sigma' / C h) / (w_{Qz} + w_{Fsp} + w_{Ca} + w_{Dol} + w_{Cly} + TOC) \times 100\% \quad (3)$$

式中: $BI3$ 为脆性指数 3, %; σ' 为有效应力, Pa; C 为成岩系数; h 为地层厚度, m。

4 结论与展望

4.1 结论

(1) 有机孔的发育是其自身特征作用的结果,其发育受有机质成熟度、类型和显微组分的影响,在成熟阶段较好的有机质类型和易生烃的组分更容易产生有机孔;但有机孔的数量首先受 TOC 含量的影响,其次受有机质类型和成熟度的影响。

(2) 有机孔在地层条件下易受压实破坏,从而导致高 TOC 页岩中有机孔更易受压实闭合而减少;在过成熟阶段,已形成的有机质发生纤维化,导致有机孔发生破坏,数量明显减少;页岩中的基质沥青充填在有机孔中也会造成有机孔的堵塞,降低其孔隙度和比表面积。

(3) 有机质对页岩储层的改造体现在以下几方面:一是有机质热演化过程中产生的酸性流体溶蚀长石、白云石等脆性矿物形成溶蚀孔,增加页岩的储集物性;二是有机孔吸纳的水分与甲烷分子形成同步及竞争吸附降低页岩的储集能力;三是有机质含量高造成页岩韧性增强,不利于压裂改造。

4.2 展望

尽管国内外学者对页岩有机质特征及储集性能开展了大量的研究工作,但目前这些研究仍然存在研究不够系统和深入的情况。在今后的研究中,根据中国页岩气储层既有海相过成熟页岩地层、又广泛发育低成熟陆相页岩地层和复杂的海陆过渡相页岩地层的特殊情况,建议着重开展以下几方面的理论研究工作。

(1) 系统地开展中国陆相、海陆过渡相和海相页岩有机质特征对比研究,揭示不同沉积环境下页岩有机孔发育规律及差异。中国发育有多套富有机质泥页岩,如上扬子地区的海相牛蹄塘组和龙马溪组页岩,海陆过渡相龙潭组页岩,以及鄂尔多斯盆地发育的海陆过渡相山西组页岩和陆相低成熟延长组页岩。这些页岩所具有的有机碳含量、成熟度、干酪根类型和显微组成存在很大的差异,也会造成有机孔发育差异很大。因此,有必要系统地开展中国不同地层页岩有机孔发育特征及主控因素的研究,总结有机孔演化规律,归纳不同沉积地层有机孔在储层中所起的作用,深化不同沉积环境下

页岩气富集规律和评价指标研究。

(2) 系统研究不同类型(或显微构成)的有机质中孔隙与成熟度的演化关系。通过对不同类型和显微组成的低成熟纯干酪根进行热模拟实验,研究不同成熟度条件下不同类型干酪根中孔隙发育及演化规律,归纳不同成熟度下干酪根显微组成的演化规律以及不同显微组成对孔隙发育的影响;进一步明确有机孔的赋存载体究竟是以干酪根为主还是以焦沥青为主。

(3) 定量化分析页岩中不同类型孔隙所占的比例及对页岩游离气和吸附气的贡献。目前主要是利用软件对图像中孔隙进行数字化分析,但该方面的工作较为分散,没有统一的定量化分析标准和软件分析系统,且以往量化的效果不明显,因而需要结合孔隙测试实验(如 CO₂ 和 N₂ 吸附测试、压汞测试)等方法来综合分析有机孔在孔隙系统中的贡献,以及进一步分析有机孔对游离气和吸附气的贡献。

参考文献:

- [1] JARVIE D M, HILL R J, RUBLE T E, et al. Unconventional shale-gas system: the Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 475-499.
- [2] 梁兴, 张廷山, 杨洋, 等. 滇黔北地区筇竹寺组高演化页岩气储层微观孔隙特征及其控制因素 [J]. 天然气工业, 2014, 34(2): 18-26.
- [3] 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.
- [4] CHALMERS G R L, BUSTIN R M. The organic matter distribution and methane capacity of the Lower Cretaceous strata of Northeastern British Columbia, Canada [J]. International Journal of Coal Geology, 2007, 70: 223-239.
- [5] 张烈辉, 唐洪明, 陈果, 等. 川南下志留统龙马溪组页岩吸附特征及控制因素 [J]. 天然气工业, 2014, 34(12): 63-69.
- [6] 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.
- [7] FISHMAN N S, HACKLEY P C, LOWERS H A, et al. The nature of porosity in organic-rich mudstones of the Upper Jurassic Kimmeridge Clay Formation, North Sea,

- offshore United Kingdom [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2012, 103: 32–50.
- [8] 朱如凯, 白斌, 崔景伟, 等. 非常规油气致密储集层微观孔隙结构研究进展 [J]. *古地理学报*, 2013, 15(5): 615–623.
- [9] 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.
- [10] REED R M, LOUCKS R G, MILLIKEN K. Heterogeneity of shape and microscale spatial distribution in organic-matter-hosted pores of gas shales [J]. *AAPG Annual Convention, Geological Society of America Abstracts with Programs*, 2012, 44(7): 551.
- [11] MILLIKEN K L, RUDNICKI M, AWWILLER D, et al. Organic matter-hosted pore system, Marcellus Formation (Devonian), Pennsylvania [J]. *AAPG Bulletin*, 2013, 97(2): 177–200.
- [12] TIAN H, PAN L, XIAO X M, et al. A preliminary study on the pore characterization of Lower Silurian black shales in the Chuandong Thrust Fold Belt, southwestern China using low pressure N₂ adsorption and FE-SEM methods [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 48: 8–19.
- [13] 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.
- [14] TIAN H, PAN L, ZHANG T W, et al. Pore characterization of organic-rich Lower Cambrian shales in Qiannan Depression of Guizhou Province, Southwestern China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 62: 28–43.
- [15] JARVIE D M. shale resource systems for oil and gas: Part 1 – shale – gas resource systems [C]. *AAPG Memoir* 2012: 69–87.
- [16] 曹涛涛, 宋之光, 王思波, 等. 下扬子地台二叠系页岩储集物性特征及控制因素 [J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(2): 341–351.
- [17] 黄仁春, 倪楷. 焦石坝地区龙马溪组页岩有机质孔隙特征 [J]. *天然气技术与经济*, 2014, 8(3): 15–18.
- [18] HILL R J, ZHANG E T, KATZ B J, et al. Modeling of gas generation from the Barnett Shale, Fort Worth Basin [J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91(4): 501–521.
- [19] 薛莲花, 杨巍, 仲佳爱, 等. 富有机质页岩生烃阶段孔隙演化——来自鄂尔多斯延长组地质条件约束下的热模拟实验证据 [J]. *地质学报*, 2015, 89(5): 970–978.
- [20] SLATT M R, 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.
- [21] 王道富, 王玉满, 董大忠, 等. 川南下寒武统筇竹寺组页岩储集空间定量表征 [J]. *天然气工业*, 2013, 33(7): 1–10.
- [22] 程鹏, 肖贤明. 很高成熟度富有机质页岩的含气性问题 [J]. *煤炭学报*, 2013, 38(5): 737–741.
- [23] CHEN J, XIAO X M. Evolution of nanoporosity in organic-rich shales during thermal maturation [J]. *Fuel*, 2014, 129(4): 173–181.
- [24] 罗小平, 吴飘, 赵建红, 等. 富有机质泥页岩有机质孔隙研究进展 [J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2015, 42(1): 50–59.
- [25] CAO T T, SONG Z G, WANG S B, et al. A comparative study of the specific surface area and pore of different shales and their kerogens [J]. *Science China Earth Science*, 2015, 58(4): 510–522.
- [26] 曹涛涛, 宋之光, 罗厚勇, 等. 煤、油页岩和页岩微观孔隙差异及其储集机理 [J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(11): 2208–2218.
- [27] 王中鹏, 张金川, 孙睿. 西页1井龙潭组海陆过渡相页岩含气性分析 [J]. *地学前缘*, 2015, 22(2): 243–250.
- [28] 袁野, 赵靖舟, 耳闯, 等. 鄂尔多斯盆地中生界及上古生界页岩孔隙类型及特征研究 [J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2014, 29(2): 14–21.
- [29] ZHANG T W, GEOFFREY S E, STEPHEN C R, et al. Effect of organic-matter type and thermal maturity on methane adsorption in shale-gas system [J]. *Organic Geochemistry*, 2012, 47(6): 120–131.
- [30] 吴强, 李成林, 江传力, 等. 瓦斯水合物生成控制因素探讨 [J]. *煤炭学报*, 2005, 30(3): 283–287.
- [31] 李祥春, 何学秋, 聂百胜. 甲烷水合物在煤层中存在的可能性 [J]. *天然气工业*, 2008, 28(3): 130–132.
- [32] CHALMERS G R, BUSTIN R M, POWER I M, et al. Characterization of gas shale pore systems by porosimetry, pycnometry, surface area, and field emission scanning electron microscopy/transmission electron microscopy image analyses: examples from the Barnett, Woodford, Haynesville, Marcellus, and Doig units [J]. *AAPG Bulletin*, 2012, 96(6): 1099–1119.
- [33] CHEN Q, ZHANG J C, TANG X, et al. Relationship

- between pore type and pore size of marine shale: an example from the Sinian-Cambrian formation, upper Yangtze region, South China [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2016, 158: 13-28.
- [34] LOUCKS R G, REED R M, STEPHEN C R, et al. Spectrum of pore types and networks and a descriptive classification for matrix-related mud rock pores [J]. *AAPG Bulletin*, 2012, 96(6): 1071-1098.
- [35] 龙鹏宇, 张金川, 姜文利, 等. 渝页1井储层孔隙发育特征及其影响因素分析 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2012, 43(10): 3954-3963.
- [36] 田华, 张水昌, 柳少波, 等. 压汞法和气体吸附法研究富有机质页岩孔隙特征 [J]. *石油学报*, 2012, 33(3): 419-427.
- [37] BUSTIN R M, CLARKSON C R. Geological controls on coalbed methane reservoir capacity and gas content [J]. *International Journal of Coal Geology*, 1998, 38: 3-26.
- [38] Bernard S, Wirth R, Schreiber A, et al. Formation of nanoporous pyrobitumen residues during maturation of the Barnett Shale (Forth Worth Basin) [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2012, 103: 3-11.
- [39] 马勇, 钟宁宁, 程礼军, 等. 渝东南两套富有机质页岩的孔隙结构特征——来自 FIB-SEM 的启示 [J]. *石油实验地质*, 2015, 37(1): 109-116.
- [40] 聂海宽, 边瑞康, 张培先, 等. 川东南地区下古生界页岩储层微观类型与特征及其对含气量的影响 [J]. *地学前缘*, 2014, 21(4): 331-343.
- [41] CAO T T, SONG Z G, WANG S B, et al. Characterizing the pore structure in the Silurian and Permian shales of the Sichuan Basin, China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 61: 140-150.
- [42] VALENZA J J, DRENZEK N, MARQUES F, et al. Geochemical controls on shale microstructure [J]. *Geology*, 2013, 41(5): 611-614.
- [43] MASTALERZ M, SCHIMMELMANN A, DROBNIAK A, et al. Porosity of Devonian and Mississippian New Albany shale across a maturation gradient: insights from organic petrology, gas adsorption, and mercury intrusion [J]. *AAPG Bulletin*, 2013, 97(10): 1621-1643.
- [44] 胡海燕. 富有机质 Woodford 页岩孔隙演化的热模拟实验 [J]. *石油学报*, 2013, 34(5): 820-825.
- [45] HU H Y, et al. Experimental investigation of changes in methane adsorption of bitumen-free Woodford shale with thermal maturation induced by hydrous pyrolysis [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 59: 114-128.
- [46] GUO H J, JIA W L, PENG P A, et al. The composition and its impact on the methane sorption of lacustrine shales from the Upper Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 57: 509-520.
- [47] ROSS D J K, BUSTIN R M. The importance of shale composition and pore structure upon gas storage potential of shale gas reservoirs [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26: 916-927.
- [48] 何建华, 丁文龙, 崔景龙, 等. 页岩微观孔隙成因类型研究 [J]. *岩性油气藏*, 2015, 26(5): 30-35.
- [49] JIN Z K, YU K H. Characteristics and significance of the burial dissolution of dolomite reservoirs: taking the Lower Paleozoic in eastern Tarim Basin as an example [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2011, 38(4): 428-434.
- [50] 郭秋麟, 陈晓明, 宋焕琪, 等. 泥页岩埋藏过程中孔隙度演化与模型预测探讨 [J]. *天然气地球科学*, 2013, 24(3): 439-449.
- [51] 朱日房, 张林晔, 等. 渤海湾盆地东营凹陷泥页岩有机储集空间研究 [J]. *石油实验地质*, 2012, 34(4): 352-356.
- [52] 崔景伟, 邹才能, 朱如凯, 等. 页岩孔隙研究新进展 [J]. *地球科学进展*, 2012, 27(12): 1319-1325.
- [53] 白玉润. 松辽盆地扶余一新立地区扶余油层的溶蚀孔隙 [J]. *石油与天然气地质*, 1988, 9(2): 163-172.
- [54] JOUBERT J I, GREIN C T, BIENSTOCK D, et al. Effect of moisture on the methane capacity of American coals [J]. *Fuel*, 1974, 53(3): 186-191.
- [55] HILDENBRAND A, KROOSS B M, BUSCH A, et al. Evolution of methane sorption capacity of coal seams as a function of burial history—a case study from the Campine Basin, NE Belgium [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2006, 66: 179-203.
- [56] 付永强, 马发明, 曾立新, 等. 页岩气藏储层压裂实验评价关键技术 [J]. *天然气工业*, 2011, 31(4): 51-54.
- [57] 王鹏, 纪友亮, 潘仁芳, 等. 页岩脆性的综合评价方法——以四川盆地 W 区下志留统龙马溪组为例 [J]. *天然气工业*, 2013, 33(12): 48-53.
- [58] 陈吉, 肖贤明. 南方古生界 3 套富有机质页岩矿物组成与脆性分析 [J]. *煤炭学报*, 2013, 38(5): 822-826.

编辑 刘兆芝

Advances in Logging Identification of Lithology and Fracture in Metamorphic Reservoir

Lu Shikuo, Li Dongdong

(China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266580, China)

Abstract: Based on the specialty of major rock-forming minerals and elementary composition of metamorphite, the detailed and systematical literature review, analysis and summary are completed for a series of lithology and reservoir fracture identification technologies with logging that are developed in recent years. Research shows that nuclear logging series in conventional logging are more favorable to identify the metamorphic lithology. In addition, ECS (elemental capturespectroscopy) and other new logging technologies can be applied to identify metamorphic lithology. Due to the complex and diverse metamorphic lithologies, the corresponding reservoir identification standard should be established for metamorphic reservoir identification based on lithology identification. The applicable conventional logging methods for metamorphic reservoir fracture identification mainly include dual lateral logging, acoustic logging, dual lateral logging-microspherical focus, borehole diameter logging, natural gamma ray spectrology logging, etc. In addition, acoustic-resistivity imaging logging, multipolar array acoustic logging, cross dipole acoustic logging and other new logging technologies with unique advantages are increasingly applied for metamorphic reservoir fracture identification. Currently, there are no generally applicable standards for logging identification of metamorphic lithology and reservoir fracture. The specific metamorphic reservoir development and field actual logging data in specific areas should be considered to study the logging identification and evaluation.

Key words: metamorphite; lithology identification; fracture identification; logging; advance

Effects of Organic Matter Properties on Organic Pore Development and Reservoir

Cao Taotao^{1,2}, Song Zhiguang³

(1. Sinopec Exploration & Development Research Institute, Wuxi, Jiangsu 214126, China;

2. Nanjing University, Chengdu, Nanjing, Jiangsu 210093, China;

3. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong 510640, China)

Abstract: Previous explorations demonstrate that the shale reservoir space is mainly contributed by organic pore and one of the most significant aspects in shale gas exploration is to investigate the development and its influencing factors of organic pore. Detailed and comprehensive literature review is completed to discuss the evolution and controlling factors of organic pore and further summarize the effects of organic matter on reservoir dissolution, aqosity and brittleness. Research shows that organic pore development mainly results from the combined interaction of favorable organic matter with high maturity and maceral with prone hydrocarbon-generation. The developed organic pores are hard to be preserved due to the damage of compaction, over-mature carbonization and bitumen filling in matrix. The transformations of organic matter on shale reservoir include the development of dissolved pores due to the dissolution of acid fluid that produced during the thermal evolution of organic matter on feldspar, dolomite and other minerals, organic pore absorbs moisture and reduces adsorption capacity, and the toughness increased by high organic matter content is unfavorable to shale reservoir stimulation. According to the complex continental transitional and marine shale gas reservoirs and their differences in hydrocarbon accumulation, the types of organic matter and maceral compositions of shales with different sedimentary facies should be further investigated in the next stage to analyze their effects on organic pore development, quantitatively identify the contribution of organic pore to reservoir space and study the major occurrence carriers of organic pore.

Key words: shale reservoir; organic pore; organic matter properties; dissolution; brittleness index

Genesis Analysis and Geological Application of Gas Component Carbon Isotope Reversal

He Cong^{1,2}, Ji Liming¹, Su Ao³, Wu Yuandong^{1,2}, Zhang Mingzhen¹

(1. Key Laboratory of Petroleum Resources Research, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. CNPC BGP INC., Zhuozhou, Hebei 072750, China)

Abstract: In order to promote the application of carbon isotope reversal in the geological exploration of natural gas, detailed and comprehensive literature review is completed to systematically summarize the geneses and principles of natural gas alkane component carbon isotope reversal. The corresponding geneses and principles include mixture of organic gas and inorganic gas, bacterial oxidative degradation, mixture of gases with different types (oil-gas and coal-gas), mixture of asynchronous gases or gases with different sources (such as primary gas and secondary gas), high-temperature and high-pressure (mixture of gases from gas layer and water layer, sulfate thermal oxidation-reduction reaction, Rayleigh fractionation), natural gas migration and diffusion, etc. Analysis shows that carbon isotope reversal can be widely applied in the geological exploration of natural gas. The corresponding major applications of carbon isotope reversal consist of identifying the genesis and source of natural gas, determining parent material maturity and secondary changes, characterizing natural gas geology and optimize the prospective area of natural gas.

Key words: natural gas alkane component; carbon isotope sequence reversal; genesis analysis; geological exploration of natural gas

Deformation Behavior of Underground Salt Rock in Kuqa Kelasu Tectonic Zone

Wang Honghao^{1,2}, Li Jianghai^{1,2}, Wei Bo^{1,2}, Huang Shaoying³, Neng Yuan³

(1. Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Beijing 100871, China;

2. Peking University, Beijing 100871, China;

3. PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla, Xinjiang 841000, China)

Abstract: 3D seismic interpretation is used to analyze the special distribution of underground salt rock in Kelasu tectonic zone. The seismic facies modes within salt rock are established by well-seismic combination to explore the effect of salt rock deformation on the distribution of high-pressure saline aquifer. Research shows a significant difference in the spatial distribution of underground salt rock between Keshen and Dabei workareas. The differences in regional salt rock distributions result from the original sedimentary boundaries of previous diapir, palaeohigh and salt rock. The seismic facies modes of salt rock within the workarea that can be identified are classified into 4 categories, namely sedimentation, flow, fold and fault. Different seismic facies modes indicate different rheology states in the salt rock. Fusiform seismic facies with well-developed high-pressure saline aquifer is the most widely developed in this work area. High-pressure saline aquifer generally develops in the core of sheath fold and the area enclosed by both re-