

DOI:10.16788/j.hddz.32-1865/P.2023.01.008

引用格式:石刚,龚赞,黄宁,等. 下扬子宣涇地区二叠系大隆组页岩含气量主控因素分析——以港地1井为例[J]. 华东地质, 2023, 44(1): 93-102. (SHI G, GONG Z, HUANG N, et al. The main controlling factors of the gas content in the Permian Dalong Formation of the Xuanjing area, the lower Yangtze region: a case study of Gangdi 1 Well[J]. East China Geology, 2023, 44(1): 93-102.)

下扬子宣涇地区二叠系大隆组页岩含气量 主控因素分析——以港地1井为例

石刚, 龚赞, 黄宁, 叶隽, 周道容, 邵威, 滕龙, 廖圣兵, 李建青

(中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016)

摘要: 下扬子地区发育了寒武系、志留系和二叠系3套有利成藏的页岩, 资源潜力大, 但存在页岩含气量主控因素不明确的问题。为此, 以下扬子宣涇地区港地1井为依托, 钻遇的70.1 m厚上二叠统大隆组富有机质页岩为目的层, 对岩心系统取样并应用对比分析法, 在纵向上连续动态地进行包括矿物成分、孔隙结构、总有机碳(Total Organic Carbon, TOC)、镜质体反射率(vitrinite reflectance, Ro)和有机质类型等研究工作, 深入分析TOC、Ro和有机质类型等地球化学指标与含气量之间的对应关系, 从而厘定了影响含气量的关键地球化学参数。分析结果表明: TOC与页岩含气量之间存在强正相关关系; 在有机质成熟阶段中期, Ro与含气量之间相关性偏弱, 对含气量变化没有明显的影响; 有机质类型对页岩含气量有重要影响, 但是两者的相关性弱于TOC。通过对大隆组页岩从顶部到底部的系统分析, 探索了用一套完整页岩在纵向上分析含气量影响因素的新方法。

关键词: 下扬子宣涇地区; 二叠系大隆组; 含气量; 总有机碳; 有机质成熟度

中图分类号: P618.12

文献标识码: A

文章编号: 2096-1871(2023)01-093-10

页岩气赋存方式和成藏机理与常规天然气明显不同。页岩气是以吸附态和游离态形式赋存于孔隙度和渗透率都远低于常规储层的页岩中, 对盖层和保存条件要求相对较低^[1-2], 使得构造复杂区油气聚集成藏成为可能, 为油气勘探开拓了新的领域。在新区勘探中评价油气资源量是一项重要的工作, 对页岩气资源量进行评价通常需要考虑TOC、Ro、有机质类型、页岩含气量、页岩厚度等参数, 其中含气量是对页岩气资源量进行评价的关键参数^[3]。刘莉等^[4]、王社教等^[5]、曾凡武^[6]对上扬子地区五峰组—龙马溪组页岩样品TOC与含气量之间的关系进行了分析; 邱小松等^[7]、徐国盛等^[8]对中

扬子地区五峰组—龙马溪组和泥盆系—二叠系页岩样品TOC与含气量之间的关系进行了分析。上述不同学者关于TOC与含气量之间的关系观点基本一致, 认为TOC与含气量之间有明显的正相关关系。前人虽然对页岩含气性做了较为细致的分析, 但主要是用TOC数据进行静态统计拟合分析, 缺乏在纵向上连续、动态地分析一套完整地层含气量变化特征的深入研究。

为此, 本文通过划分典型地区二叠系大隆组页岩层段, 分析纵向上各层段页岩TOC、Ro、有机质类型等指标对大隆组页岩含气量的影响程度, 研究各种因素之间相关性特征, 通过对一套完整地层中

* 收稿日期: 2022-11-10 修订日期: 2023-03-06 责任编辑: 叶海敏

基金项目: 中国地质调查局“安徽皖江地区1:5万页岩气地质调查(编号: 12120115100801)”和“下扬子地区油气页岩气调查评价(编号: DD20221662)”项目联合资助。

第一作者简介: 石刚, 1980年生, 男, 高级工程师, 博士, 矿产普查与勘探专业, 主要从事页岩油气地质调查与评价工作。Email: sgaug@163.com。

通信作者简介: 李建青, 1967年生, 男, 教授级高级工程师, 博士, 矿产普查与勘探专业, 主要从事页岩油气勘探与石油地质综合研究。Email: Lijianqing1967@126.com。

页岩含气量的系统分析,更客观、准确、真实地反映关键影响因素,为关键评价指标的建立提供了借鉴。

1 区域地质背景

下扬子地区位于扬子地块东北缘,西部以郯庐断裂为界与鲁苏造山带相连,东部向南黄海延伸,西南部以赣江断裂为界与中扬子地区相邻,东南部以江绍断裂为界与华夏地块相隔。下扬子地区自震旦纪以来经历了多期构造运动,特别是中生代以来的脆性构造变形对古生代海相沉积盆地破坏尤为强烈^[9-15],总体上具有构造复杂、变形剧烈、岩浆活动强的特点,对油气勘探形成了极大的挑战。

近年来,下扬子地区二叠系页岩逐步引起专家学者的重视,多家地质调查单位和油气公司持续投入勘探工作。南京地质调查中心在安徽省宣城市港口镇部署实施了地质调查井——港地 1 井,在上二叠统大隆组富有机质页岩中获得页岩气、页岩油、煤层气和致密砂岩气的勘探发现。通过全井段取心与现场解吸工作,为深入研究纵向上含气性变化特征打下了坚实基础。

工作区位于安徽省宣城-泾县地区南陵盆地南缘的水东向斜(图 1),构造破坏相对较小,古生代地层较为连续,二叠系从老到新依次发育了栖霞组、孤峰组、龙潭组和大隆组 4 套地层,与下伏石炭系呈整合接触,与上覆三叠系呈平行不整合接触。上二

叠统大隆组沉积环境为深水陆棚相-盆地边缘相沉积环境^[16],沉积形成了钙质碳质页岩、碳质页岩、硅质碳质页岩等富含有机质的页岩。

2 样品采集与测试分析

港地 1 井完钻井深 1 502 m,目的层为二叠系大隆组、龙潭组和孤峰组,其中大隆组钻遇地层完整,顶底界线清楚,富有机质页岩厚度约 70.1 m。采用现场解吸法对大隆组页岩进行含气量测试,从顶至底依次开展现场解吸实验 18 次,实验样品间隔约 3 m。取心采用绳索取心方式,将岩心从井底取到地表仅需约 15 min,极大降低了岩心中游离气的损失,为获取真实页岩含气量数据提供了保证。对应现场解吸实验深度采集 18 块岩心样品进行了 TOC 实验;采集 17 件样品进行了 Ro 实验,其中 11 件样品与 TOC 样品相对应,6 件样品为对应 TOC 样品相邻位置采样;采集 7 件岩心样品进行有机质类型实验,其中 4 件样品是与 Ro 相对应,3 件样品是对应 TOC 样品相邻位置采样。所有实验均在中国石油化工股份有限公司华东油气分公司实验研究中心完成,其中 TOC 测试参照相应的国家标准, Ro、有机质类型、矿物成分和孔隙结构采用石油行业相应标准。

TOC 测试标准参照《GB/T 19145—2003 沉积岩中总有机碳的测定》^[17],首先用稀盐酸将样品中的无机碳去除,然后在高温氧气流中燃烧,使总有机碳转化成二氧化碳,经红外检测并给出总有机碳的含量。

Ro 测试在 MY-9000 型数字煤岩分析仪上进行,测定标准参照《SY/T5124—2012 沉积岩中镜质体反射率测定方法》^[18]。工作原理是利用光电效应原理,通过光电倍增管将反射光(波长 $(546\pm 5)\text{nm}$)强度转变为电流强度,并与相同条件下已知反射率的标样产生的电流强度相比较,从而获得样品的镜质组反射率。采用双标法进行标定。选用两块反射率值分别高于和低于待测对象的反射率标样在油浸条件下反复标定仪器,直至仪器达到最佳现性状态为止。

有机质类型是评价页岩质量和生烃潜力的重要指标,本文主要根据干酪根镜检结果作为评判有机质类型的方法,有机质类型测试在 MY-9000 型数字煤岩分析仪上进行,测定标准参照《SY/T 5125—

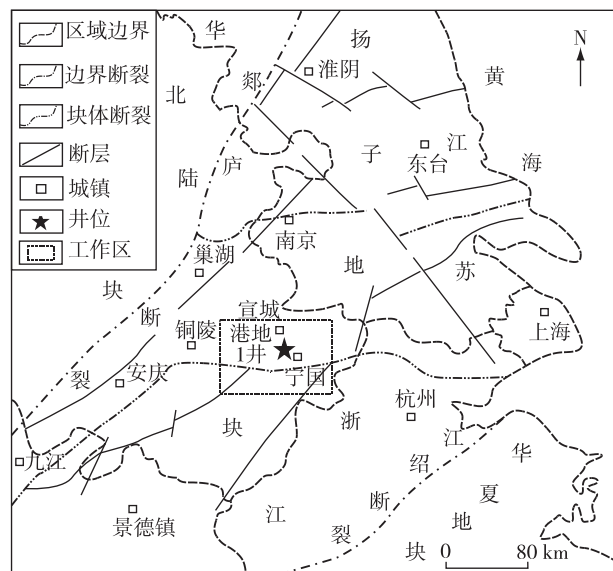


图 1 工作区及港地 1 井位置图(据文献[13]修编)

Fig. 1 The Location of work area and Gangdi 1 Well (modified after [13])

2014 透射光-荧光干酪根显微组分鉴定及类型划分方法》^[19]。

矿物成分采用 Ultima IV 组合型多功能水平 X-射线衍射仪进行测试,测定标准参照《SY/T 5163—2010 沉积岩中黏土矿物和常见非黏土矿物 X 射线衍射分析方法》^[20]。孔隙结构首先采用美国 Gaton 氩离子抛光仪进行抛光,然后用德国 ZEISS 生产的 SIGMA 热场发射扫描电子显微镜进行孔隙结构观察,测定标准参照《SY/T 5162—2014 岩石样品扫描电子显微镜分析方法》^[21]。

3 大隆组页岩储层特征

港地1井大隆组页岩厚度约70.1 m,依据岩性特征整体上可以划分为3段:下段为黑色硅质碳质泥页岩,中段发育黑色碳质泥页岩,上段为黑色碳质泥岩夹灰黑色砂质条带。通过岩心观察,页岩水平层理发育,污手现象明显,岩心断面可见生物化石、植物化石和星点状黄铁矿。

3.1 有机质特征

(1)有机质丰度。实验数据显示大隆组页岩的 TOC 值为 0.91%~6.99%,平均值 2.67%,主体分布在 2.0~3.5%;其中,超过 4.0%的有 3 块样品,

最高值为 6.99%;从浅到深,出现 2 个峰值,分别在 943.8 m 和 979.2 m,整体上呈现双峰型排列。

(2)有机质成熟度。大隆组页岩的 R_o 为 1.08%~1.29%,平均值 1.2%,主体分布在 1.15%~1.25%;其中,1 块样品 $> 1.25\%$ (实测数据 1.29%),1 块样品 $< 1.1\%$ (实测数据 1.08%),整体上变化区间不大,处于热演化成熟阶段中期。下扬子地区地温梯度为 $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 2.5\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ^[22],考虑到大隆组厚度为 70.1 m,地温梯度变化约 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$,对有机质热演化的影响较小, R_o 没出现较大的波动与地温梯度变化相吻合。

(3)有机质类型。实验结果显示大隆组页岩的干酪根类型以 II 型为主,其中,II₁ 型干酪根样品 2 块,II₂ 型干酪根样品 4 块,III 型干酪根样品 1 块。大隆组上段干酪根类型以 II₁ 型为主,局部发育 III 型干酪根,中下段干酪根类型以 II₂ 型为主,干酪根类型的变化与沉积时水体深度变化以及物源供给有关,在一定程度上反映了沉积环境的变化。

3.2 矿物组成

本区大隆组富有机质页岩中脆性矿物含量较高,含量为 45.8%~62.9%,平均值 53.48% (图 2)。脆性矿物中以石英为主,含量为 29.2%~

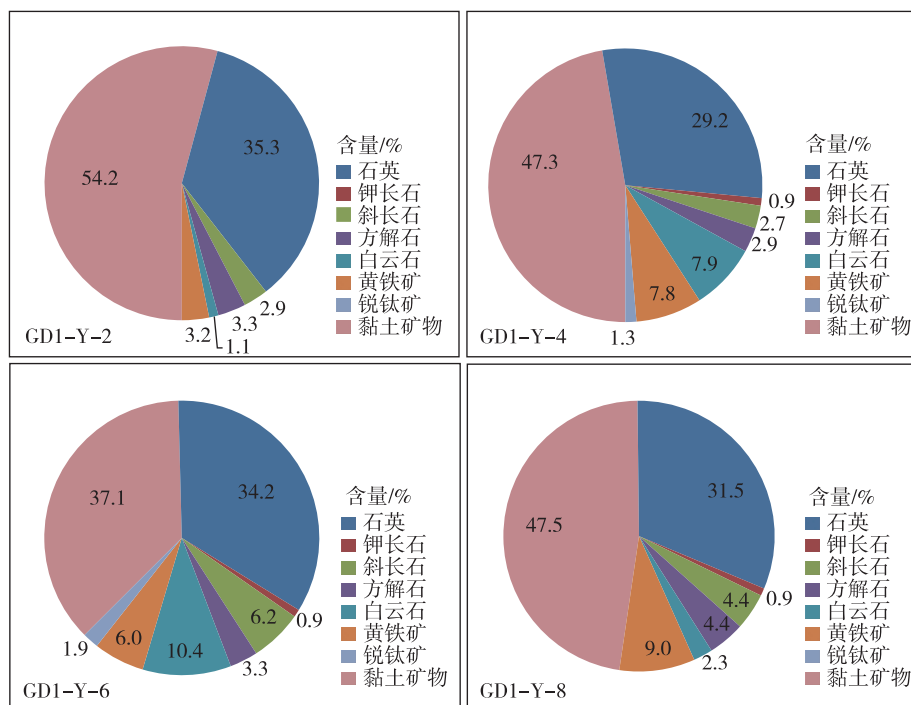


图2 港地1井上二叠统大隆组矿物成分饼状图

Fig. 2 Pie chart of mineral composition of Late Permian Dalong Formation in the Gangdi 1 Well

35.3%, 平均值 32.55%; 其次为黄铁矿, 含量为 3.2%~9%, 平均值 6.50%; 白云石含量为 1.1%~10.4%, 平均值 5.40%; 方解石含量为 2.9%~3.3%, 平均值 3.48%。通过电子显微镜观察, 岩心样品中的黄铁矿呈草莓状发育, 反映黄铁矿没有发生过成岩改造, 是在沉积过程中形成的矿物, 结合其较高的含量, 反映了当时的沉积环境为还原环境, 非常有利于页岩中有机质的发育和保存。

大隆组黏土矿物含量为 37.1%~54.2%, 平均值 46.53%, 主要发育伊/蒙混层(I/S)、伊利石(I)、高岭石(K)和绿泥石(C)等矿物。其中以伊/蒙混层(I/S)为主, 含量为 69%~79%, 平均值 73.75%。依据岩石成岩阶段划分方案^[23], 伊/蒙混层含量高反映二叠系大隆组页岩处于成岩阶段的中成岩半成熟阶段, 与有机质演化程度相吻合。

上扬子焦石坝地区龙马溪组页岩的脆性矿物含量为 33.9%~80.3%, 平均值 56.5%; 黏土矿物含量为 16.6%~62.8%, 平均值 40.9%^[24]。下扬子地区大隆组页岩脆性矿物和黏土矿物含量与上扬子地区龙马溪组页岩接近, 参考龙马溪组页岩储层改造经验,

说明大隆组页岩具备良好的压裂改造条件。

3.3 页岩储集空间类型

本区大隆组富有机质页岩中主要发育有机质孔、晶间孔和裂隙等纳米级孔隙。有机质孔通常发育在成岩作用晚期, 是热演化过程中通过有机质裂解生气在页岩中形成的孔隙; 晶间孔是在矿物结晶过程中, 受结晶作用的影响, 在晶体颗粒之间形成的孔隙。通过氩离子抛光制片和扫描电子显微镜观察, 大隆组页岩中发育的孔隙呈椭圆形、三角形、四边形和不规则形, 孔隙直径变化较大, 为 88.4~397 nm。有机质孔受热演化程度及矿物成分的影响, 孔隙的密集程度呈现明显的非均质性发育(图 3(a)、图 3(b)), 裂隙较为发育, 裂隙宽度为 30~60 nm、密度约 1~2 条/ μm (图 3(c)、图 3(d))。上扬子焦石坝地区下志留统龙马溪组一段, 页理缝密度为 3.5~8.6 条/cm, 有机质孔隙多为 2~50 nm 的中孔^[25], 桂中坳陷下泥盆统页岩主要发育粒间孔、晶间孔、溶蚀孔等孔隙^[26], 对比上扬子地区孔隙结构, 下扬子地区上二叠统大隆组富有机质页岩中各类纳米级孔隙和裂隙较为发育, 能够为页岩油气的聚集成藏提供较为有利的储集空间。

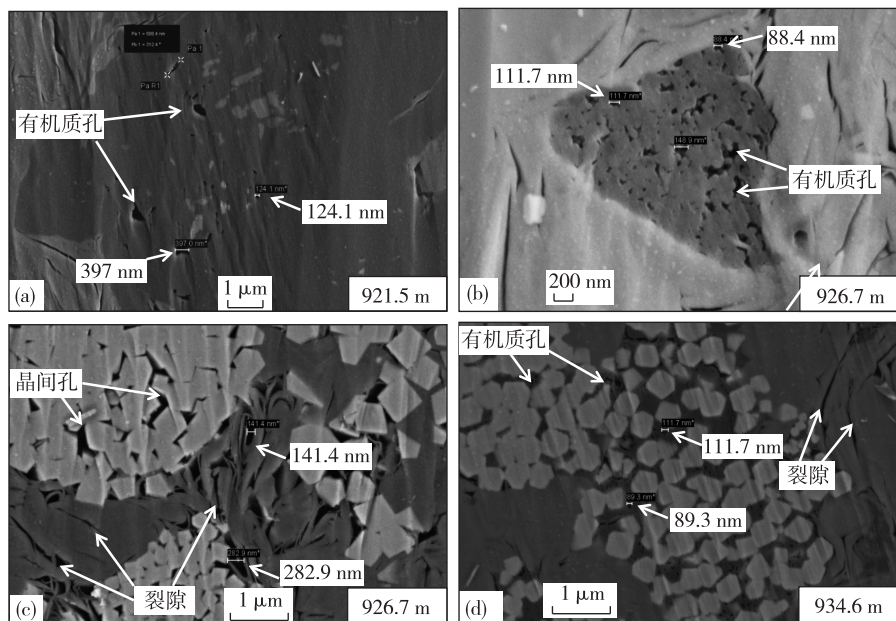


图 3 港地 1 井上二叠统大隆组页岩储集空间类型图

Fig. 3 Pore types of shale in late Permian Dalong Formation in Gangdi 1 Well

根据国际理论和应用化学协会(IUPAC)提出的孔隙分类方案^[27], 孔径 <2 nm 的称为微孔, 孔径 2~50 nm 的称为中孔, 孔径 >50 nm 的称为宏

孔。大隆组富有机质页岩孔径分布较大, 各种孔径孔隙均有发育: 微孔占总孔隙的比例 2.1%~18.9%, 平均值 11.50%(图 4); 中孔占总孔隙的

比例 59.5%~70.7%, 平均值 65.1%; 宏孔占总孔隙的比例 21.4%~27.3%, 平均值 24.35%。

在所有孔隙中, 中孔占比超过 60%, 是页岩油气储集成藏的主要孔隙类型。

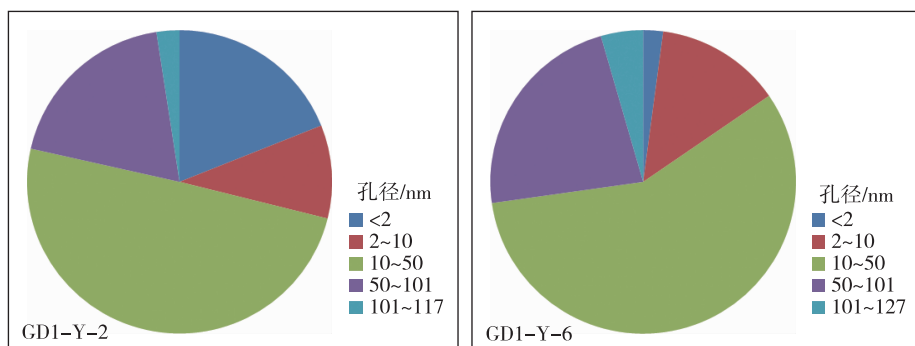


图 4 港地 1 井大隆组孔径分布饼状图

Fig. 4 Pie chart of pore size distribution of Dalong Formation in Gangdi 1 Well

4 大隆组含气量主控因素分析

4.1 有机质丰度对含气量的影响

含气量是评价页岩气资源量的重要指标^[28-29], 运用概率体积法计算时, 含气量数据的轻微变化就能引起资源量的巨大变化。因此, 含气量参数的准确与否是进行资源评价的关键问题。港地 1 井现场解吸实验数据显示含气量为 1.0~1.2 m³/t, 采用实测数据更能真实反映地层的含气性变化特征。

关于含气量与 TOC 的关系, 以往多用统计方法进行静态拟合^[5,30], 无法连续、动态地反映 TOC 变化对含气量的影响; 只有通过纵向上连续分析页岩 TOC 变化趋势, 并动态地分析含气量的变化趋势, 才能更客观、准确地反映含气量与 TOC 的相关性, 也能更直观地观察产生影响的关键要素。

在港地 1 井, 随着地层由浅到深, 大隆组页岩含气量整体由低到高逐渐增加, 但局部突然升高呈现出双峰型特征, 峰值分别出现在 943.8 m 和 979.0 m, 低值分别在 917.7 m 和 956.8 m。TOC 与含气量的变化趋势近乎完全一致, 也呈现出明显的双峰型特征, 峰值和低值也基本相同, 显示出两者具有很强的正相关关系, 从而说明 TOC 是影响大隆组页岩含气量的一个关键参数。

4.2 有机质成熟度对含气量的影响

研究表明, 有机质成熟度对页岩含气量有重要影响, 但是认识并不统一。STRAPOC D 等^[31]

在研究伊利诺伊盆地东部泥盆系—密西西比系页岩时, 认为随着有机质成熟度的增加, 页岩中纳米级有机质孔隙不断增加, 导致页岩的比表面积增加, 从而有利于吸附气含量的增加, 因此, 整体上页岩含气量与有机质成熟度基本呈正相关关系。CHALMERS G R L 等^[32]通过研究英属哥伦比亚地区下白垩系页岩, 则认为页岩吸附气含量与有机质成熟度呈负相关关系。党伟等^[33]通过研究辽河西部凹陷沙河街组页岩, 发现有机质成熟度的增加促使有机质生烃引起有机碳含量迅速降低, 从而使页岩吸附能力迅速下降, 导致随着有机质成熟度的增加, 页岩吸附气含量呈现降低的趋势。

本区大隆组页岩的 Ro 分布在 1.08%~1.29%, 集中在 1.15%~1.25%; 在低点和高点处 (Ro=1.08%, Ro=1.29%), 页岩含气量没有出现明显的低值和高值, Ro=1.29% 样品对应的含气量仅为峰值的一半 (图 5)。在含气量的两个峰值点, 对应样品的 Ro 没有明显的增加, 在埋深 943.8 m 处含气量高峰值对应样品 Ro 值为 1.15%, 属于相对低点; 在埋深 979.0 m 处含气量高峰值对应样品 Ro 值为 1.2%, 没有明显的增大。这说明处于成熟阶段中期的大隆组页岩含气量对 Ro 的变化并不敏感。

大隆组页岩含气量与 Ro 变化没有明显的对应关系, 应与 Ro 相对较低有关。大隆组页岩 Ro 整体低于 1.30%, 处于热演化成熟阶段的中期, 这一演

化阶段的典型特征是干酪根既能生油又能生气,有机质热演化还未进入干气阶段,气态烃还没有大量裂解生成。由此可知,当有机质热演化达到成熟阶段中期, R_o 在 $1.15\% \sim 1.30\%$ 时, R_o 不是影响页岩含气量的关键因素。

4.3 有机质类型对含气量的影响

有机质类型是评价干酪根质量和生烃潜力的重要指标,在常规和非常规油气勘探中均有学者进行了专门的研究。秦建中等^[34]采用热压模拟实验对柴达木盆地北缘侏罗系暗色泥岩的有机质类型和生烃潜力进行了详细研究,结果表明Ⅱ型有机质的生油量和排油量均高于Ⅲ型有机质。王杰等^[35]研究苏里格庙气田烃源岩时,认为有机质类型是决定生烃量大小和

生成油气类型的重要因素。王亚东等^[36]通过研究四川盆地长宁地区龙马溪组页岩,得出不同类型的干酪根对页岩气的吸附率和富集规律有重要影响,良好的有机质类型是页岩气生成、富集的重要条件。林腊梅等^[37]在研究辽河坳陷沙三段陆相富有机质页岩后提出,当 $R_o > 1.2\%$ 时以生气为主,其中Ⅰ型干酪根的生气率是Ⅲ型干酪根的 5~6 倍,Ⅱ型干酪根生气率是Ⅲ型干酪根的 2~4 倍。

港地 1 井二叠系大隆组岩心分析表明,Ⅱ₂ 型和Ⅲ型页岩样品对应的含气量相对较高,Ⅱ₁ 型页岩样品对应的含气量较低。对比 3 种有机质类型对含气量的影响(图 5),证明大隆组页岩中Ⅱ₂ 型和Ⅲ型有机质类型对含气量贡献大。

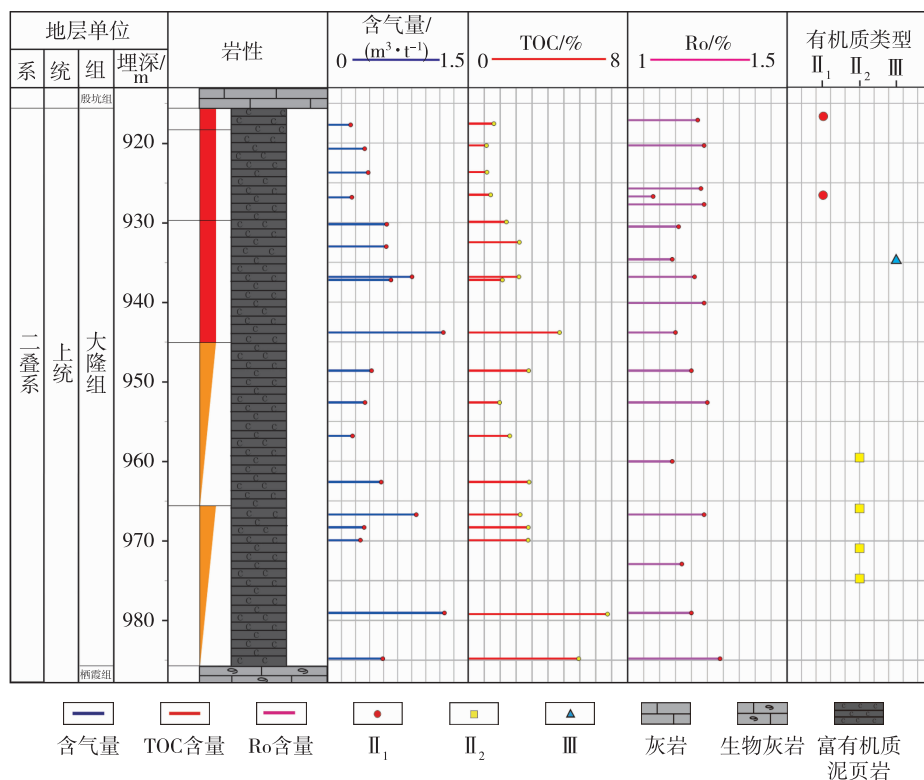


图 5 港地 1 井含气量与有机地化指标对比分析图

Fig. 5 Comparative analysis of gas content and organic geochemical indicators in Gangdi 1 Well

有机质类型是影响富有机质页岩含气量的一个重要因素,但港地 1 井大隆组页岩有机质类型对含气量的影响程度明显弱于 TOC,这同样可能与 R_o 相对较低有关。对比上扬子古生界龙马溪组页岩 R_o 值($2.2\% < R_o < 3.13\%$)^[38],港地 1 井大隆组富有机质页岩的 R_o 值较低($1.15\% < R_o <$

1.25%),现阶段正处于成熟阶段中期,有机质尚未热裂解生成大量页岩气,Ⅱ₁ 型干酪根相对于Ⅱ₂ 型干酪根生油能力较强,Ⅱ₂ 型干酪根相对于Ⅲ型干酪根生气能力较强,Ⅱ₁ 型干酪根中的液态烃尚未裂解成气态烃,因而形成了Ⅱ₂ 型干酪根页岩含气量相对较大的现象。

5 结论

(1)下扬子宣涇地区港地1井二叠系大隆组整套页岩地层含气量与地球化学指标纵向对比表明,TOC与含气量的变化趋势、峰值与低值的吻合性均非常好,证明TOC是影响含气量的关键地质因素。

(2)下扬子宣涇地区二叠系大隆组页岩处于有机质热演化成熟阶段中期($1.15\% < Ro < 1.25\%$),与上扬子地区志留系龙马溪组页岩相比Ro较低,导致了Ro与含气量相关性较弱。

(3)下扬子宣涇地区大隆组页岩有机质类型与页岩含气量的相关性弱于TOC,但其Ⅱ₂型与Ⅲ型干酪根对应的含气量整体较高,说明有机质类型也是评价页岩含气量时不能忽视的一个重要地质要素。

参考文献

- [1] 张金川,金之钧,袁明生.页岩气成藏机理和分布[J].天然气工业,2004,24(7):15-18.
ZHANG J C, JIN Z J, YUAN M S. Reservoiring mechanism of shale gas and its distribution[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(7): 15-18.
- [2] 薛会,张金川,刘丽芳,等.天然气机理类型及其分布[J].地球科学与环境学报,2006,28(2):53-57.
XUE H, ZHANG J C, LIU L F, et al. Distribution and mechanic classification of gas[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2006, 28(2): 53-57.
- [3] 张金川,林腊梅,李玉喜,等.页岩气资源评价方法与技术:概率体积法[J].地学前缘,2012,19(2):184-191.
ZHANG J C, LIN L M, LI Y X, et al. The method of shale gas assessment; Probability volume method[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(2): 184-191.
- [4] 刘莉,包汉勇,李凯,等.页岩储层含气性评价及影响因素分析以涪陵页岩气田为例[J].石油实验地质,2018,40(1):58-63.
LIU L, BAO H Y, LI K, et al. Evaluation of gas content in shale reservoirs and analysis of influencing factors in Fuling shale gas field[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2018, 40(1): 58-63.
- [5] 王社教,王兰生,黄金亮,等.上扬子区志留系页岩气成藏条件[J].天然气工业,2009,29(5):45-50.
WANG S J, WANG L S, HUANG J L, et al. Accumulation conditions of shale gas reservoirs in Silurian of the Upper Yangtze region[J]. Nature Gas Industry, 2009, 29(5): 45-50.
- [6] 曾凡武.彭水地区五峰组—龙马溪组页岩气富集主控因素[J].中国煤炭地质,2016,28(11):25-29.
ZENG F W. Main controlling factors of shale gas enrichment in Pengshui Area Wufeng, Longmaxi Formations[J]. Coal Geology of China, 2016, 28(11): 25-29.
- [7] 邱小松,杨波,胡明毅.中扬子地区五峰组—龙马溪组页岩气储层及含气性特征[J].天然气地球科学,2013,24(6):1274-1283.
QIU X S, YANG B, HU M Y. Characteristics of shale reservoirs and gas content of Wufeng-Longmaxi Formation in the middle Yangtze region[J]. Natural Gas Geoscience 2013, 24(6): 1274-1283.
- [8] 徐国盛,张震,罗小平,等.湘中和湘东南拗陷上古生界泥页岩含气性及其影响因素[J].成都理工大学学报(自然科学版),2013,40(5):577-587.
XU G S, ZHANG Z, LUO X P, et al. Gas-bearing characteristics and affected factors of Upper Paleozoic shale in depressions of Central Hunan and Southeast Hunan, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science and Technology Edition), 2013, 40(5): 577-587.
- [9] 丁道桂,李凤丽.下扬子区中—新生代变格构造运动[J].石油实验地质,2020,42(5):687-697.
DING D G, LI F L. Mesozoic and Cenozoic diktyogenesis in the Lower Yangtze Region [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2020, 42(5): 687-697.
- [10] 丁道桂,王东燕,刘运黎.下扬子地区古生代盆地的改造变形[J].地学前缘,2009,16(4):61-73.
DING D G, WANG D Y, LIU Y L. Transformation and deformation of the Paleozoic basins in lower Yangtze areas[J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(4): 61-73.
- [11] 殷启春,方朝刚,郑红军,等.下扬子地区奥陶纪页岩气地质条件及远景区优选[J].华东地质,2020,41(1):70-78.
YIN Q C, FANG C G, ZENG H J, et al. Geological conditions of Ordovician shale gas and optimization for prospective areas in the Lower Yangtze region[J]. East China Geology, 2020, 41(1): 70-78.
- [12] 彭晓东,徐锦龙,方朝刚,等.宣广盆地中二叠世栖霞组层序地层特征及页岩气勘探前景[J].华东地质,2022,43(3):154-166.
PENG X D, XU J L, FANG C G, et al. Sequence stratigraphic characteristics and shale gas exploration prospect of Middle Permian Qixia Formation in the Xuancheng-Guangde Basin [J]. East China Geology.

- 2022, 43(3):154-166.
- [13] 姚柏平, 陆红, 郭念发. 论下扬子地区多期构造格局叠加及其油气地质意义[J]. 石油勘探与开发, 1999, 26(4):10-13.
- YAO B P, LU H, GUO N F. Superposition of multi period tectonic pattern and oil geological significance in lower Yangtze Region[J]. Petroleum Exploration and Development, 1999, 26(4):10-13.
- [14] 张宗言, 何卫红, 韦一, 等. 下扬子中生代沉积盆地演化[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2014, 39(8):1017-1033.
- ZHANG Z Y, HE W H, WEI Y, et al. Evolution of Mesozoic sedimentary basins in the Lower Yangtze[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2014, 39(8):1017-1033.
- [15] 庄建建, 杨凤丽, 赵文芳. 下扬子区印支—早燕山期的构造特征及应力场模拟[J]. 高校地质学报, 2010, 6(4):475-482.
- ZHUANG J J, YANG F L, ZHAO W F. Tectonic characteristics and numerical stress field simulation in Indosinian-Early Yanshanian stage, Lower Yangtze Region[J]. Geological Journal of China Universities, 2010, 6(4):475-482.
- [16] 廖志伟, 胡文瑄, 曹剑, 等. 下扬子皖南大隆组黑色岩系发育特征及油气资源潜力初探[J]. 高校地质学报, 2016, 22(1):138-151.
- LIAO Z W, HU W X, CAO J, et al. A preliminary investigation of the development and hydrocarbon potential of the black shales in the Upper Permian Dalong Formation, Southern Anhui Province in the Lower Yangtze Region, China[J]. Geological Journal of China Universities, 2016, 22(1):138-151.
- [17] 中国石油勘探开发研究院, 中海石油研究中心渤海研究院, 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院无锡实验地质研究所, 等. GB/T 19145—2003 沉积岩中总有机碳的测定[S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2003.
- Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Bohai Research Institute of CNOOC Research Center, Wuxi Institute of Experimental Geology of Sinopec Petroleum Exploration and Production Research Institute, et al. GB/T 19145—2003 Determination of total organic carbon in sedimentary rock [S]. Beijing: State Administration for Market Regulation, 2003.
- [18] 中国石油勘探开发研究院, 中国石化胜利油田地质科学院. SY/T5124—2012 沉积岩中镜质体反射率测定方法[S]. 北京: 国家能源局, 2012.
- Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Shengli oil field Exploration and Development Research Institute. SY/T5124—2012 Method of determining microscopically the reflectance of vitrinite in sedimentary[S]. Beijing: National Energy Administration, 2012.
- [19] 中国石油勘探开发研究院, 中国石化胜利油田地质科学院. SY/T 5125—2014 透射光-荧光干酪根显微组分鉴定及类型划分方法[S]. 北京: 国家能源局, 2014.
- Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Shengli oil field Exploration and Development Research Institute. SY/T 5125—2014 Method of identification microscopically the macerals of kerogen and indivision the kerogen type by transmitted-light and fluorescence[S]. Beijing: National Energy Administration, 2014.
- [20] 中国石油西南油气田分公司勘探开发研究院, 中国石油大庆油田勘探开发研究院, 中国石化胜利油田地质科学研究院, 等. SY/T 5163—2010 沉积岩中黏土矿物和常见非黏土矿物 X 射线衍射分析方法[S]. 北京: 国家能源局, 2010.
- Exploration and Development Research Institute of Southwest oil and gas field branch, Research Institute of Exploration and Development of Daqing Oilfield Company Ltd, Shengli oil field exploration and Development Research Institute, et al. SY/T 5163—2010 Analysis method for clay minerals and ordinary non-clay minerals in sedimentary rocks by the X-ray diffraction [S]. Beijing: National Energy Administration, 2010.
- [21] 中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司地质科学研究院, 中国石油勘探开发研究院石油地质实验研究中心. SY/T 5162—2014 岩石样品扫描电子显微镜分析方法[S]. 北京: 中国石油天然气总公司, 2014.
- Shengli oil field Exploration and Development Research Institute, Research Institute of Petroleum Exploration and Development. SY/T 5162—2014 Analytical method of rock sample by scanning electron microscope [S]. Beijing: China National Petroleum Corporation, 2014.
- [22] 王良书, 李成, 施央申, 等. 下扬子区地温场和大地热流密度分布[J]. 地球物理学报, 1995, 38(4): 469-476.
- WANG L S, LI C, SHI Y S, et al. Distribution of geotemperature and terrestrial heat flow density in Lower Yangtze Area [J]. Acta Geophysica Sinica, 1995, 38(4): 469-476.
- [23] 刘林玉, 柳益群, 陈刚. 吐鲁番坳陷中—上侏罗统碎屑

- 岩中的自生黏土矿物特征及其成岩意义[J]. 岩石学报, 1998, 14(2): 258-268.
- LIU L Y, LIU Y Q, CHEN G. Property and diagenetic significance of authigenic clay mineral in Upper and Middle Jurassic clastic rock of Tulufan Depression, Xinjiang[J]. Acta Petrologica Sinica, 1998, 14(2): 258-268.
- [24] 郭彤楼. 涪陵页岩气田发现的启示与思考[J]. 地学前缘, 2016, 23(1): 28-35.
- GUO T L. Discovery and characteristics of the Fuling shale gas field and its enlightenment and thinking[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(1): 28-35.
- [25] 龙胜祥, 彭勇民, 刘华, 等. 四川盆地东南部下志留统龙马溪组一段页岩微-纳米观地质特征[J]. 天然气工业, 2017, 37(9): 23-30.
- LONG S X, PENG Y M, LIU H, et al. Micro-and nano-scale geological characteristics of the shale in the first Member of Lower Silurian Longmaxi Fm in SE Sichuan Basin[J]. Nature Gas Industry, 2017, 37(9): 23-30.
- [26] 谭旭航, 王雁, 侯明才, 等. 桂中坳陷南丹地区中一下泥盆统塘丁组富有机质页岩储层特征[J]. 天然气勘探与开发, 2017, 40(2): 26-31.
- TAN X H, WANG Y, HOU M C, et al. Characteristics of Tangding Formation or ganic-rich shale in Nandan area Guizhong Depression[J]. Natural Gas Exploration And Development. 2017, 40(2): 26-31.
- [27] 张慧, 焦淑静, 李贵红, 等. 非常规油气储层的扫描电镜研究[M]. 北京: 地质出版社, 2016.
- ZHANG H, JIAO S J, LI G H, et al. The research on Unconventional Oil and Gas Reservoirs by scanning electronic microscope [M]. Beijing: Geology Press, 2016.
- [28] 聂海宽, 张金川. 页岩气聚集条件及含气量计算-以四川盆地及其周缘下古生界为例[J]. 地质学报, 2012, 86(2): 349-361.
- NIE H K, ZHANG J C. Shale gas accumulation conditions and gas content calculation: A case study of Sichuan Base and its periphery in the lower Paleozoic[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(2): 349-361.
- [29] 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): 153-158.
- TU Y, ZOU H Y, MENG H P, et al. Evaluation criteria and classification of shale gas reservoirs[J]. Oil and Gas Geology, 2014, 35(1): 153-158.
- [30] 张汉荣. 川东南地区志留系页岩含气量特征及其影响因素[J]. 天然气工业, 2016, 36(8): 36-42.
- ZHANG H R. Gas content of the Silurian shale in the SE Sichuan Basin and its controlling factors[J]. Nature Gas Industry, 2016, 36(8): 36-42.
- [31] STRAPOC D, MASTALERZ M, SCHIMMELMANN A, et al. Geochemical constraints on the origin and volume of gas in the New Albany Shale (Devonian-Mississippian), eastern Illinois Basin[J]. AAPG Bulletin, 2010, 94(11): 1713-1740.
- [32] CHALMERS G R L, BUSTIN R M. Lower Cretaceous gas shales in northeastern British Columbia, Part I: geological controls on methane sorption capacity [J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 2008, 56(1): 1-21.
- [33] 党伟, 张金川, 黄潇, 等. 陆相页岩含气性主控地质因素——以辽河西部凹陷沙河街组三段为例[J]. 石油学报, 2015, 36(12): 1516-1530.
- DANG W, ZHANG J C, HUANG X, et al. Main-controlling geological factors of gas-bearing property of continental shale gas: a case study of Member 3rd of Shahejie Formation in western Liaohe sag[J]. Acta Petrologica Sinica, 2015, 36(12): 1516-1530.
- [34] 秦建中, 李志明, 张志荣. 不同类型煤系烃源岩对油气藏形成的作用[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(4): 131-136.
- QIN J Z, LI Z M, ZHANG Z R. Contribution of various coal measures source rocks to oil and gas reservoir formation [J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(4): 131-136.
- [35] 王杰, 张晓宝, 陈践发. 苏里格庙气田煤系烃源岩生烃特征评价[J]. 煤田地质与勘探, 2005, 33(2): 26-29.
- WANG J, ZHANG X B, CHEN J F. Evaluation of the hydrocarbon-generating characteristic for coal-bearing hydrocarbon-source rocks of Suligemiao gas field [J]. Coal Geology and Exploration, 2005, 33(2): 26-29.
- [36] 王亚东, 潘仁芳, 曾俊峰, 等. 有机质类型及演化特征对页岩气富集规律的影响[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2016, 18(1): 17-20.
- WANG Y D, PAN R F, ZENG J F, et al. The Impact of Organic Matter Type and Its Evolution Characteristics on the Enrichment Regularity of Shale Gas[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition), 2016, 18(1): 17-20.
- [37] 林腊梅, 张金川, 唐玄, 等. 中国陆相页岩气的形成条件[J]. 天然气工业, 2013, 33(1): 35-40.
- LIN L M, ZHANG J C, TANG X, et al. Conditions of continental shale gas accumulation in China[J]. Nature Gas Industry, 2013, 33(1): 35-40.

- [38] 郭旭升. 南方海相页岩气“二元富集”规律——四川盆地及周缘龙马溪组页岩气勘探实践认识[J]. 地质学报, 2014, 88(7): 1209-1218.
- GUO X S. Rules of two-factor enrichment for marine

shale gas in Southern China-Understanding from the Longmaxi Formation shale gas in Sichuan Basin and its surrounding area[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(7): 1209-1218.

The main controlling factors of the gas content in the Permian Dalong Formation of the Xuanjing area, the lower Yangtze region: a case study of Gangdi 1 Well

SHI Gang, GONG Zan, HUANG Ning, YE Jun, ZHOU Daorong, SHAO Wei,
TENG Long, LIAO Shengbing, LI Jianqing
(Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China)

Abstract: There are three favorable shale reservoirs developed in Cambrian, Silurian and Permian in the lower Yangtze region. Even though with great gas potential, the main controlling factors of shale gas content are not yet clear. Therefore, based on the Gangdi 1 Well in the Xuanjing area of the Lower Yangtze region, we took the drilled 70 m shale of the Late Permian Dalong Formation as the target layer for core sampling, and made continuous and dynamic studies on mineral composition, pore structure, Total Organic Carbon, vitrinite reflectance(Ro) and organic matter types in vertical direction by comparative analysis. The corresponding relationship between gas content and geochemical indicators, namely TOC, Ro and organic matter type were further researched and accordingly the key geochemical parameters affecting the gas content were determined. Analysis results show a strong positive correlation between TOC and shale gas content, and a relatively weak correlation between Ro and gas content in the middle process of organic matter maturation, which less affected the gas content change. At the same time, organic matter type has an important impact on shale gas content, but the correlation is weaker than that with TOC. Through systematic analysis on Dalong Formation shale from top to bottom, we figure out a new method to analyze the factors that affect gas content in the vertical direction.

Key words: The Xuanjing area in Lower Yangtze region; Permian Dalong Formation; gas content; Total Organic Carbon; maturity of organic matter