

下扬子地区“三气一油”钻探发现及成藏地质条件 ——以皖南港地1井钻探发现为例

石刚, 徐振宇, 郑红军, 殷启春, 滕龙, 周道容, 方朝刚, 邵威, 王佳龙, 黄正清
SHI Gang, XU Zhenyu, ZHENG Hongjun, YIN Qichun, TENG Long, ZHOU Daorong,
FANG Chaogang, SHAO Wei, WANG Jialong, HUANG Zhengqing

中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏南京 210016

Nanjing Geological Survey Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China

摘要:下扬子地区经历了多期构造运动,地质条件复杂,对油气保存条件产生了重要影响。页岩油气具有自生自储的特性,与常规油气相比,对保存条件的要求较低,在下扬子地区具备形成页岩油气藏的潜力。通过港地1井钻探,在下扬子地区二叠系大隆组和龙潭组获得了页岩油、页岩气、煤层气和致密砂岩气“三气一油”的发现,与常规油气“上气下油”不同,港地1井油气呈现“上油下气”式非常规油气储集方式。大隆组富有机质页岩厚度约70m,地层倾角 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$,现场解吸获取的页岩气样品甲烷含量达80%,有机质丰度为1.9%~2.3%,平均值约2.0%,有机质成熟度(R_o)为1%~1.25%,平均值约1.2%,具备生成页岩油气的良好基础。基于港地1井的钻探发现,认为下扬子地区构造运动影响弱、盆地规模小、保存条件好的“小而整”的拗陷或盆地具备形成页岩油气藏的地质条件。

关键词:页岩油;页岩气;下扬子;二叠系;大隆组

中图分类号:P618.13 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2019)09-1564-07

Shi G, Xu Z Y, Zheng H J, Yin Q C, Teng L, Zhou D R, Fang C G, Shao W, Wang J L, Huang Z Q. “Three-Gas-One-Oil” drilling findings and reservoir formation geological conditions in the lower Yangtze area: Exemplified by Gang Di 1 well in South Anhui. *Geological Bulletin of China*, 2019,38(9):1564-1570

Abstract: In the lower Yangtze region, the tectonic movement is complicated and the geological conditions are complex, which has a great impact on the conditions of oil and gas accumulation and preservation. The shale has the characteristics of generating gas and storing gas. The requirements for preservation conditions are relatively lower than those for conventional oil and gas, which makes it possible to form a large oil and gas reservoir in lower Yangtze region. Through drilling the Gang Di 1 well, the authors revealed “Three-Gas-One-Oil” feature that includes shale oil, shale gas, coalbed gas and tight sandstone gas in Permian Dalong Formation and Longtan Formation in lower Yangtze region. It is different from conventional oil and gas storage in which gas is in the upper part and oil is in the lower part; therefore, the feature revealed by the authors is an unconventional oil and gas reservoir mode. It is observed that organic shale thickness is about 70m, and formation dip is about $10^{\circ}\sim 25^{\circ}$ in the core of GD1. The in situ desorption data show that methane content is about 80%. Experimental data show TOC is 1.9%~2.3%, about 2.0% on average; R_o is about 1%~1.25%, about 1.2% on average in the core of GD1. Based on GD 1 drilling discovery, the authors hold that the “small and whole” depression or basin has the geological conditions for forming shale oil and gas reservoirs with weak tectonic movement, small basin and good preservation conditions in the lower Yangtze region.

Key words: shale oil; shale gas; lower Yangtze; Permian; Dalong Formation

收稿日期: 2018-04-18; 修订日期: 2019-06-18

资助项目: 中国地质调查局项目《安徽皖江地区1:5万页岩气地质调查》(编号: 12120115100801)和山东省自然科学基金联合专项《泥页岩成岩作用及其成藏、成矿机制研究》(编号: ZR2014DL004)

作者简介: 石刚(1980-), 男, 博士, 从事页岩油气地质调查与勘探工作。E-mail: sgaugo@163.com

通讯作者: 黄正清(1965-), 男, 高级工程师, 从事页岩气地质调查工作。E-mail: 463968827@qq.com

页岩油气已经成为当今油气资源研究领域进展最快的油气类型,最近几年中国在页岩气勘探开发领域取得的成果显著,四川涪陵页岩气田已经实现商业开采,成为北美之外第二个实现商业开发的页岩气田,同时,在四川盆地周缘先后发现了多个页岩气田,为中国非常规油气的发展做出了巨大贡献。中国页岩气资源潜力巨大,有望成为能源工业的重要支柱^[1],页岩气资源的勘探开发对缓解中国能源供给压力,改善能源供给结构具有重要意义^[2]。但是,同属扬子地块的下扬子地区与上扬子地区具有类似的地质条件,却没有取得页岩油气的重大发现。

近年来,油气公司、地矿部门陆续在下扬子地区开展了油气勘探,部署了多口调查井和油气探井,对下扬子地区页岩油气发育层位进行了调查研究,认为下扬子地区具备发育页岩气的地质条件^[3-5]。中国地质调查局南京地质调查中心自 2013 年以来陆续在下扬子地区开展了页岩油气调查工作,先后部署了基础地质调查工作和地质调查井钻探工作,在系统分析前人工作成果的基础上,于 2015 年部署实施了“港地 1 井”钻探,在矿权空白区、新的层系取得了页岩气、煤层气、致密砂岩气和页岩油“三气一油”的发现。

多期构造运动对下扬子地区油气储集、保存条件产生了较大影响。近年来,地质研究者将研究对象从下古生界逐渐转移到上古生界,特别是针对上古生界二叠系页岩展开了较详细的研究。周东升等^[6]、蔡周荣等^[7]对二叠系龙潭组页岩发育特征进行了研究,陈平等^[8]通过露头剖面对大隆组进行了划分和分析,发现大隆组页岩中部为紫红色页岩,与钻井岩心观察到的页岩特征不同,这可能与露头样品受风化剥蚀影响有关。本文以港地 1 井的钻探发现为基础,对二叠系大隆组页岩的发育特征和含油气性进行论述,以期对下扬子地区页岩油气的勘探提供借鉴。

1 区域地质背景

下扬子地区位于扬子地块东北缘,西部以郟庐断裂为界,西北与鲁苏造山带相连,西南到江西九江,以赣江大断裂为界与中扬子地区相邻,南部及东南部以江绍断裂为界向南黄海延伸(图 1)。下扬子地区自震旦纪以来经历了多期构造运动,对地层破坏严重,其中,中生代以来的浅层脆性构造变

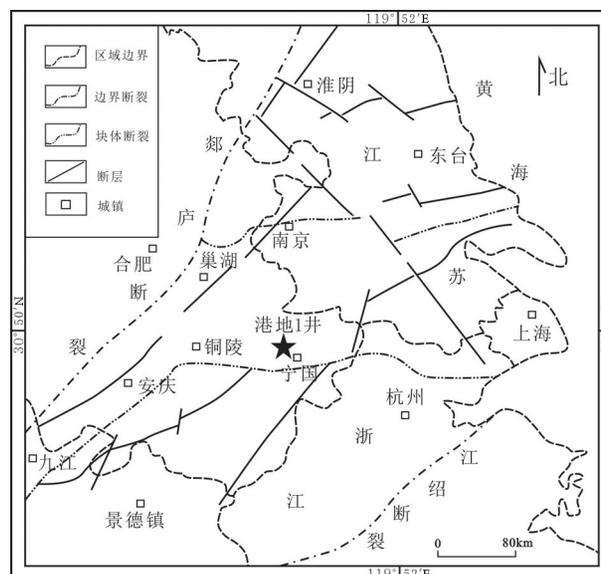


图 1 下扬子地区构造简图及港地 1 井位置
(据参考文献[9]修改)

Fig. 1 Structural outline of the lower Yangtze area and the position of GD1 well

形对海相沉积盆地破坏尤为强烈^[9-12]。总体上具有构造复杂、变形剧烈、岩浆活动强的特点,给油气勘探带来了极大的挑战。

工作区位于安徽省宣城市水东一泾县地区,地处南陵盆地南缘的水东向斜,构造破坏较小,地层发育较连续(图 2)。水东向斜西翼被第四系覆盖,轴向 45°~60°。核部为扁担山组(T₂b),轴部通过穴溪岭—港口北—虎山一带。向斜东部(包括翼及仰起端)出露地层为唐家坞群和龙山组,向北西倾斜,自西往东,翼部倾角逐渐变缓。向斜两翼地层浅部陡深部缓。港口东南面为北东向广德—绩溪构造带,南端为北西向长桥—穴溪岭断裂带,北端为一单斜构造。断裂较发育,有北东向、北北西向及近东西向 3 组,前两组在平面上构成“X”型断裂,一般断层面倾角 50°~70°。

2 港地 1 井含油气性特征

2.1 大隆组富有机质页岩特征

港地 1 井开孔层位是三叠系扁担山组灰岩,在 915.6m 进入目的层二叠系大隆组,大隆组与上覆殷坑组、下伏龙潭组为整合接触关系,地层倾角 10°~25°,整体上岩性为黑色富有机质页岩,连续厚度约

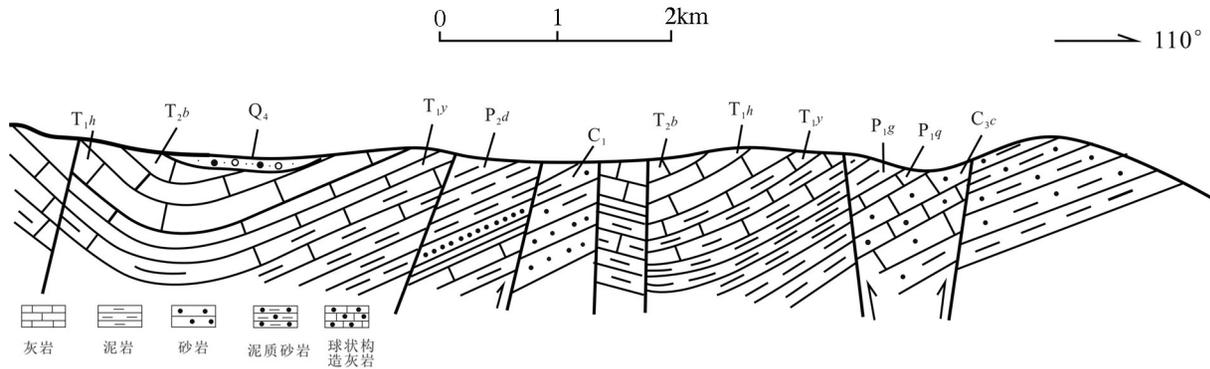


图2 水东向斜剖面图(据参考文献①修改)

Fig. 2 Geological section of Shuidong syncline

D₁₋₂tn²—唐家坞群上段;D_{3w}—五通组;C₁—下石炭统;C_{2h}—黄龙组;C_{3c}—船山组;P_{1q}—栖霞组;
P_{1g}—孤峰组;P_{2l}—龙潭组;P_{2d}—大隆组;T_{1y}—殷坑组;T_{1h}—和龙山组;T_{2b}—扁担山组下段

70m。依据岩性变化可分为3段,上段为黑色薄层碳质页岩夹灰白色粉砂质条带,厚度约20m,界面下覆地层为一套黑色钙质炭质页岩,滴稀盐酸轻微反应,厚度约3m;中段为黑色炭质页岩,与上段相比,泥质含量明显增加,发育大量的生物化石(肉眼可见大量的菊石和双壳类化石),且化石黄铁矿化,呈金黄色,反映当时的沉积环境为强还原环境,有利于有机质的形成和保存;下段为黑色硅质炭质页岩,与上段、中段相比,硅质含量、炭质含量明显增加,岩心硬度明显增大,偶见高角度方解石细脉,脉宽约2mm,抗风化能力远强于上段与中段(图3)。

2.2 大隆组富有机质页岩油气显示

港地1井的钻探在二叠系大隆组与龙潭组中获得了页岩气、煤层气、致密砂岩气及页岩油“三气一油”的发现,钻遇的油气呈“上油下气”的特征(图4),最上部为页岩油,页岩油下面依次发育页岩气、煤层气和致密砂岩气,呈现非常规油气类型。

港地1井在三叠系灰岩层段方解石脉中见到油迹显示,进入大隆组后岩性由灰岩变为黑色富有机质页岩,油气含量急剧增加。井口及泥浆槽中见大量漂浮的页岩油,页岩油呈黄绿色(图5),具柴油味,收集油样沉淀后发现呈红褐色,含油层段厚度约30m。岩心现场解吸实验显示,产油层段的页岩同时具有良好的含气性。

张金川等^[13-14]认为,页岩气指主体位于富有机质页岩中,以吸附或游离状态为主要赋存方式的天然气聚集。大隆组黑色富有机质页岩厚度约为70m。对港地1井钻遇的二叠系大隆组富有机质页岩开展现

场解吸工作,应用高精度含气量解吸仪对页岩含气量进行测试(采样间隔3~5m),大隆组富有机质页岩总含气量在0.5~1.5m³/t之间。现场随机挑选岩心进行浸水实验,实验显示大量气泡从岩心中冒出,多组气泡呈线状溢出,大的气泡直径约1mm(图6)。

大隆组与龙潭组为整合接触,接触面下为一套压煤灰岩,压煤灰岩下伏地层是皖南地区的主要产煤层,通常称为C煤层,此套煤层发育较稳定,也是区域上较好的标志层。钻遇的C煤层为粉煤,厚度约0.7m,由于煤层岩心收获率低,也较破碎(样品直径2~3cm),仅选取较大的样品进行现场解吸实验,含气量约7.2m³/t。

煤层下部发育一套厚约6m的致密砂岩,岩性为灰白色厚层粉砂岩。现场随机选取致密砂岩岩心做浸水实验,气泡从整段岩心中呈幕状不断冒出,大量的气泡在水面形成白色泡沫聚集(图7),现场解吸测得致密砂岩含气量约0.5m³/t。

2.3 页岩解吸气成分分析

现场解吸实验获采集了大量页岩气样,页岩气中甲烷含量达到80%。随机选取3个大隆组页岩气样进行气体组分分析,3个样品的甲烷含量分别接近或超过80%(图8),其中GD1-3号样品甲烷含量达83.16%,乙烷和丙烷含量接近或超过5%。分别统计样品中甲烷、乙烷和丙烷的总含量,每个样品3种烷烃的总含量接近或超过90%,其中GD1-3号样品3种烷烃的总含量达94.12%。气体组分分析实验说明,港地1井钻遇的大隆组富有机质页岩中发育的页岩气是一种可燃性较好的天然气。



图 3 港地 1 井二叠系大隆组页岩岩心

Fig. 3 GD1 well shale core of Permian Dalong Formation

3 “三气一油”成藏地质条件

总体上,下扬子地区经历了多期构造运动,地质

条件复杂,与中上扬子地区相比,保存条件更不利,早期形成的油气藏受到强烈的破坏。港地 1 井钻遇良好的油气显示,这一地区具有发育非常规油气的有利地质条件。本文通过对港地 1 井构造条件、沉积环境、有机地球化学和储集空间的研究,初步分析了下扬子地区非常规油气的成藏地质条件。

3.1 构造地质条件

下扬子地区经历了印支期挤压推覆构造和燕山期、喜马拉雅期伸展构造等^[6]多期构造运动,受构造运动的影响,整体较破碎,但是存在局部较完整的凹陷,具备油气聚集成藏的地质条件。港地 1 井位于下扬子地区南京拗陷带中的水东向斜,通过二维地震勘探,研究区构造相对简单,向斜形态较完整(图 9),晚古生代地层标定较清楚,二叠系上覆地层为一大套三叠系灰岩,保存条件较好。水东向斜为一残留向斜,面积较小,构造挤压运动形成向斜后没有受到较大的破坏,为后期页岩油气的储集与保存提供了较好的地质条件。通过港地 1 井钻遇页岩油气,说明面积小、构造简单、保存条件好的向斜区域具备发育页岩油气藏的地质条件。

3.2 沉积环境

上扬子地区上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组页岩气勘探证明,海相、深水陆棚沉积环境有利于富有机质页岩的发育,有机质类型多为 I 型或 II₁型干酪根^[15],有机质丰度较高。下扬子地区二叠系龙潭组为海陆交互相沉积环境,是发育煤系地层的良好环境。20 世纪六七十年代至八十年代,龙潭组上部的煤层是皖南地区开采煤炭的主力煤层,也证明龙潭组海陆交互相为煤层气发育提供了良好

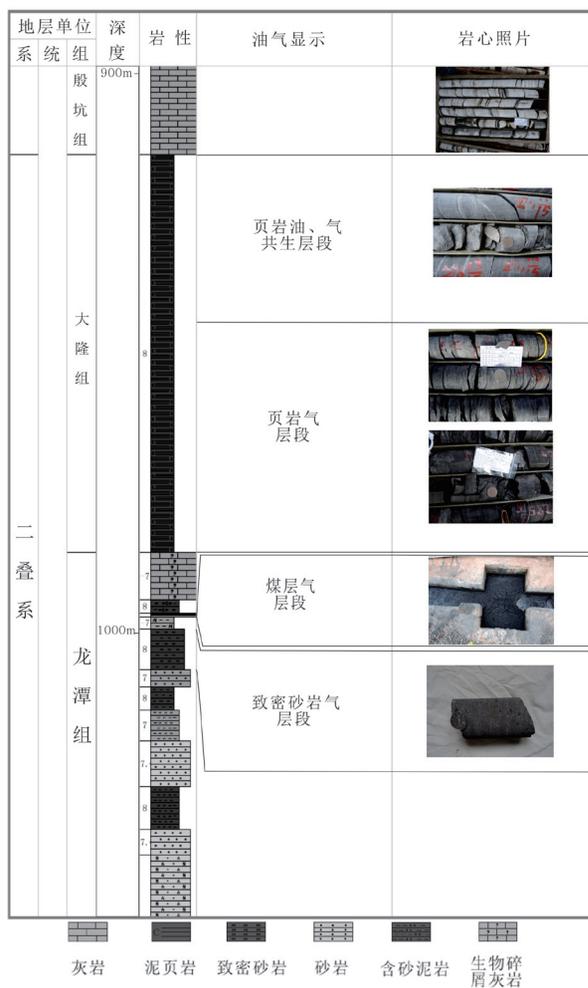


图 4 港地 1 井油气发育层段图

Fig. 4 GD1 well oil and gas layer



图5 井口泥浆槽道页岩油显示
Fig. 5 Oil and gas at wellhead

的沉积环境。下扬子泾县—水东地区二叠系大隆组沉积环境为深水陆棚相—盆地边缘相沉积环境^[16], 总体上水体较深, 发育钙质炭质页岩、炭质页岩、硅质炭质页岩等富含有机质的页岩。采集3个岩心样品进行干酪根类型实验, 2个样品为Ⅱ₁型, 1个样品为Ⅲ型, Ⅱ₁型干酪根属于生油潜力较大的干酪根类型, Ⅲ型干酪根属于生气能力较大的干酪根, 两类干酪根与钻遇的页岩油气匹配较好, 整体上, 大隆组页岩具有较大的生烃潜力。

3.3 有机地球化学

张金川等^[17]、邹才能等^[18]学者对页岩油进行了较系统的研究, 认为页岩油以游离态或吸附态赋存于富含有机质页岩、纳米级孔隙及微裂隙内的石油或非液态烃。发育页岩油的页岩中有机质成熟度(R_o)



图7 龙潭组致密砂岩浸水实验
Fig. 7 The experiment of Longtan Formation tight sandstone core in water



图6 大隆组富有机质页岩浸水实验
Fig. 6 The experiment of Dalong Formation shale core in water

在0.5%~2.0%之间, 总有机碳含量(TOC)在0.7%~3.0%之间。港地1井大隆组3个岩心样品有机地球化学实验显示, 总有机碳含量(TOC)在1.9%~2.3%之间, 平均值约为2.0%, 有机质成熟度(R_o)在1%~1.25%之间, 与美国TMS页岩的 R_o 相近^[19](0.64%~1.46%), 平均值约为1.2%。对比港地1井的地球化学指标与前人的研究成果, 大隆组有机质丰度和成熟度与页岩油发育地球化学指标吻合, 具备发育页岩油的基础条件。

3.4 储集空间

(1) 纳米级孔隙为游离气提供了较好的储集空间。大隆组富有机质页岩发育较丰富的纳米级孔隙和裂隙, 是页岩油气得以保存的重要条件。非常规油气能够保存下来的一个重要条件是具备自生自储的能力, 纳米级孔隙和裂隙是页岩油气具备自

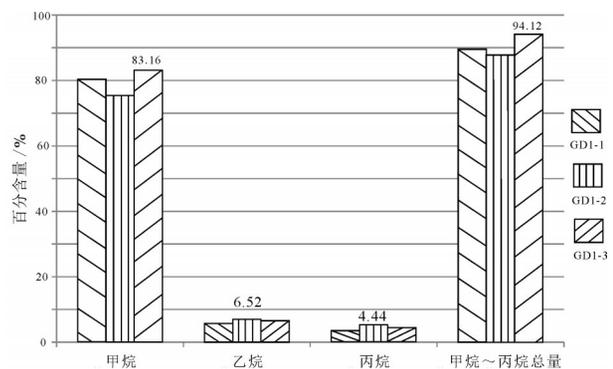


图8 现场解吸气气体组分
Fig. 8 In-situ desorption gas component

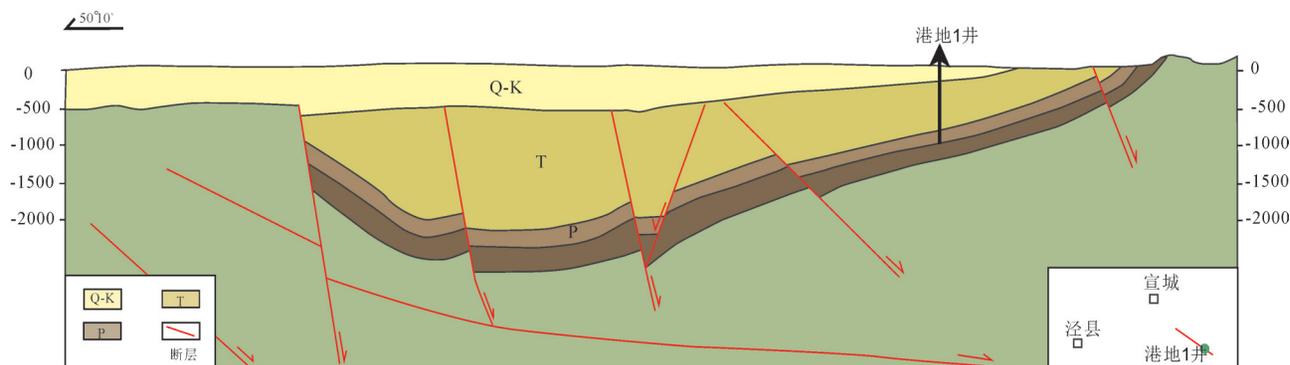


图9 港地1井过井剖面

Fig. 9 Syncline section crossing GD1 well

储能力的重要基础。通过氩离子剖光制片,扫描电子显微镜观察3个样品,大隆组富有机质页岩孔径在88~397nm之间,其中微孔(小于2nm)占比约11.5%,中孔(2~50nm)占比约65.1%,宏孔(大于50nm)占比约24.35%,中孔是对储集空间贡献最大的孔隙类型。相较常规储层,页岩储层更致密,生成的油气更容易被束缚在页岩中的纳米级孔隙中,纳米级孔隙中的页岩油气运移不受达西定律的约束,在同等条件下,能够将生成的页岩油气保存下来。

(2)页岩气有吸附态、游离态和溶解态3种基本赋存形态,其中吸附态是下扬子地区大隆组页岩气聚集成藏的重要形式。

通过对大隆组页岩样品的比表面和测试,3个样品的比表面积为7.08~9.55m²/g,平均值为8.16m²/g,与川西坳陷新页HF-1井须五段页岩比表面积(1~11m²/g)相近。陈磊等^[20]、郭怀志等^[21]研究认为,比表面是影响页岩吸附气含量的主要因素。通过对比分析港地1井与新页HF-1井页岩比表面积,大隆组泥岩具有较好的吸附能力。现场解吸测试显示,大隆组页岩中发育大量的页岩气,结合比表面积测试数据,吸附气在大隆组页岩气中占有相当高的比例,是下扬子地区二叠系大隆组富有机质页岩中页岩气聚集的重要形式。

4 结 论

(1)港地1井在二叠系大隆组、龙潭组获得了页岩气、煤层气、致密砂岩气和页岩油“三气一油”的发现。油气储集呈现“上油下气”的非常规油气储集方式,揭示下扬子地区二叠系大隆组具备发育多

种类型非常规油气的潜力。

(2)实验数据显示,港地1井大隆组富有机质页岩总有机碳含量(TOC)在1.9%~2.3%之间,平均值约2.0%,有机质成熟度(R_o)在1%~2.5%之间,平均值约1.2%,纳米级孔隙汇中,中孔(2~50nm)占比约65.1%,页岩气甲烷含量达到或超过80%,大隆组页岩厚度为70m,有利区面积约120km²,证明二叠系大隆组页岩具备良好的地化、储层条件,且厚度大、面积适中,具备良好的页岩气资源勘探前景。

(3)受构造运动影响,下扬子地区地质条件复杂,但局部地区存在有利于页岩油气发育的地质条件。港地1井的油气发现,说明构造运动影响弱、盆地规模小、保存条件好的“小而整”的凹陷或盆地具备发育页岩油气藏的潜力。

(4)港地1井的钻探发现揭示,下扬子地区二叠系大隆组是一套有利的页岩气发育层系,是开展页岩气勘探的有利目标层位,为下扬子地区页岩油气的勘探提供了有力支撑。

致谢:成文过程中得到安徽省煤田地质局相关单位的支持与帮助,审稿专家提出了宝贵的建议,在此一并表示衷心的感谢。

参考文献

- [1]张金川,徐波,聂海宽,等. 中国页岩气资源勘探潜力[J]. 天然气工业,2008,28(6):136-140.
- [2]张金川,边瑞康,荆铁亚,等. 页岩气理论研究的基础意义[J]. 地质通报,2011,30(23):318-323.
- [3]吴浩,姚素平,焦堃,等. 下扬子区上二叠统龙潭组页岩气勘探前景[J]. 煤炭学报,2013,38(5):870-876.
- [4]潘继平,乔德武,李世臻,等. 下扬子地区古生界页岩气地质条件

- 与勘探前景[J].地质通报,2011,30(2/3):337-343.
- [5]曹涛涛,宋之光,罗厚勇,等.下扬子地区二叠系海陆过渡相页岩孔隙体系特征[J].天然气地球科学,2016,27(7):1332-1344.
- [6]蔡周荣,夏斌,万志峰.下扬子芜湖地区后期构造活动特征及其对古生界页岩气保存的影响[J].煤炭学报,2013,38(5):890-895.
- [7]周东升,许林峰,潘继平,等.扬子地块上二叠统龙潭组页岩气勘探前景[J].天然气工业,2012,32(12):6-13.
- [8]陈平,张敏强,许永哲,等.下扬子巢湖—泾县地区上二叠统大隆组泥页岩储层特征[J].岩石学报,2013,29(8):2925-2935.
- [9]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.
- [10]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.
- [11]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.
- [12]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.
- [13]张金川,薛会,张德明,等.页岩气及其成藏机理[J].现代地质,2003,17(4):466.
- [14]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.
- [15]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,2014,41(1):28-36.
- [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.
- [17]张金川,林腊梅,李玉喜,等.页岩油分类与评价[J].地学前缘,2012,19(5):322-331.
- [18]邹才能,杨智,崔景伟,等.页岩油形成机制、地质特征及发展对策[J].石油勘探与开发,2013,40(1):14-26.
- [19]陈晓智,陈桂华,肖钢,等.北美TMS页岩油地质评价及勘探有利区预测[J].中国石油勘探,2014,19(2):77-84.
- [20]陈磊,姜振学,邢金艳,等.川西坳陷新页HF-1井须五段泥页岩吸附气含量主控因素及其定量预测模型[J].现代地质,2014,28(4):824-831.
- [21]郭怀志,潘保芝,张丽华,等.页岩吸附模型及吸附气含气量计算方法进展[J].地球物理学进展,2016,31(3):1080-1087.
- ①毕治国,斗守初,汪木彬.宣城幅区域地质报告(1:20万).1974.