

下扬子地区寒武系页岩气 成藏条件分析与资源潜力评价

黄正清¹, 周道容¹, 李建青¹, 吴通¹, 徐菲菲²

(1. 中国地质调查局南京地质调查中心, 南京 210016; 2. 山东科技大学, 山东青岛 266590)

摘要: 下扬子地区寒武系为海相沉积地层, 分布面积达 $13 \times 10^4 \text{ km}^2$, 其中下寒武统荷塘组(幕府山组)发育黑色碳质泥岩, 厚度达 276 m, 有机碳含量为 0.25%~23.52%, 平均含量为 4.54%, 有机质类型以 I 型为主, 页岩气成藏条件十分有利。该区下寒武统地层经历了加里东、华力西、印支、燕山和喜马拉雅期的构造运动及岩浆活动的改造, 个别地段已经成为变质岩的一部分; 很多地区荷塘组碳质泥岩演化程度较高, 镜质体反射率(R_o)最大可达 6.32%, 完全处于过成熟阶段。该区荷塘组上覆地层较厚, 但受构造影响, 荷塘组地层埋藏深度变化较大。综合荷塘组碳质泥岩的厚度、埋深、有机碳含量和镜质体反射率等 4 个方面的指标, 开展了下扬子地区寒武系地层的页岩气地质调查和潜力评价, 共划分出 3 个页岩气远景目标区, 分布于江西上饶—浙江桐庐、江苏扬州和安徽全椒等地, 估算资源量为 $288\ 944.4 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

关键词: 成藏条件; 资源潜力; 页岩气; 荷塘组; 寒武系; 下扬子地区

中图分类号: TE132.2

文献标识码: A

Shale gas accumulation conditions and resource potential evaluation of the Cambrian in the Lower Yangtze area

HUANG Zhengqing¹, ZHOU Daorong¹, LI Jianqing¹, WU Tong¹, XU Feifei²

(1. Nanjing Geological Survey Center, China Geological Survey, Nanjing, Jiangsu 210016, China;

2. Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: The Cambrian in the Lower Yangtze region is a marine sedimentary stratum with an area of $130 \times 10^3 \text{ km}^2$. The Lower Cambrian Hetang Formation (Makufushan Formation) comprises black carbonaceous mudstones with a thickness of 276 m and an organic carbon content (TOC) ranging from 0.25%–23.52%, averaging 4.54%. The organic matter is mainly of type I, showing favorable conditions for shale gas accumulation. The Lower Cambrian stratum has experienced tectonic movements and transformation during magmatic activity during the Caledonian, Hercynian, Indosinian, Yanshanian and Himalayan periods, and some individual sections have become part of metamorphic rocks. Therefore, the thermal evolution degree of carbonaceous mudstones is high in the Hetang Formation in many areas of the Lower Yangtze region. The maximum vitrinite reflectance (R_o) is 6.32%, indicating for an over mature stage. At the same time, due to large overburden and structural influence, the burial depth of the Hetang Formation also varies. The thickness, burial depth, TOC content and R_o of the carbonaceous mudstones in the Hetang Formation were applied to construct ageological survey and potential evaluation of shale gas in the Cambrian in the Lower Yangtze region. There are mainly three exploration targets including the region from the Shangrao area in the Jiangxi Province to the Tonglu area in the Zhejiang Province, the Yangzhou area in the Jiangsu Province and the Quanjiao area in the Anhui Province, with an estimated resource of $28894 \times 10^9 \text{ m}^3$.

Key words: accumulation conditions; resource potential; shale gas; Hetang Formation; Cambrian; Lower Yangtze region

下扬子地区下寒武统荷塘组(幕府山组)以暗色泥岩为主, 厚度大、分布范围广, 有机碳含量高、有机质类型以 I 型为主, 脆性矿物含量高, 具有良好的页岩气成藏条件^[1]。但由于该套地层发育至

今已有五亿四千万年的历史,经历了多期次构造活动和多轮回的沉积作用,大部分地区的页岩处于过成熟的热演化阶段,加上断裂构造的破坏,很难形成有规模的页岩气藏,这也是下扬子地区至今未能发现寒武系页岩气的主要原因。本文通过全面梳理下扬子地区寒武系富有机质泥页岩的分布特征及其有机地化指标参数情况,试图圈定页岩气远景区,优选有利目标区,评价资源潜力,指导华东地区页岩气地质调查工作的部署。

1 地质背景

下扬子地区中、新生代伴随多期次的强烈构造运动,构造演化经历了平稳沉降、挤压推覆、拉张裂隙 3 大发育阶段^[2-3];其海相中、古生界发育较大规模的冲断推覆构造,推覆构造以下志留统高家边组泥岩为滑脱面,在平面上具有明显的分带性。在海相古生界的基础上,主要发育陆相沉积,形成了一批拗陷、断拗复合型盆地。本区自震旦纪以来延续形成了从海相、海陆过渡相到陆相等多种沉积环境下的古生界海相地层,分布面积达 $13 \times 10^4 \text{ km}^2$, 厚达 3~10 km,有机质丰富,已发现大量油气显示。古生界海相地层中有 10 余套富含有机质泥页岩系,它们平面分布广,剖面层位多,累计厚度大^[4-6]。下寒武统荷塘组以暗色泥岩为主,在区内发育厚度较大,分布稳定。根据皖宁 2 井实钻资料(图 1),下寒武统荷塘组厚度达 276 m^[1];浙江安吉叶坑埠、安徽宁国南阳和石台丁香树等地表出露的荷塘组地层,实测剖面厚度分别达 241.7、227.4、641.19 m;宣页 1 井揭示荷塘组厚度达 269.8 m^[1]。无论是地表露头剖面还是钻孔中的岩心,其地质编录结果显示,荷塘组中碳质硅质泥页岩的厚度均占 60% 以上。在岩性特征上,荷塘组底部灰黑色薄层碳质硅质页岩夹薄层硅质岩,向上硅质含量减少,碳质含量增多;中部发育黑色硅质岩,节理发育;上部为灰黑色、黑色硅质碳质泥岩,夹石煤,水平层理发育并含黄铁矿;顶部发育薄层状深灰色微晶灰岩。

2 页岩气成藏主控因素分析

2.1 有机质含量

根据野外露头剖面和多口钻井中采集的 300 多件寒武系碳质硅质泥页岩样品的测试结果,有机碳含量(TOC)为 0.25%~23.52%,除去石煤层中的特高值和部分硅质泥岩的含量,其背景平均含量为 4.54%,很显然是非常好的页岩气目标层段。从全

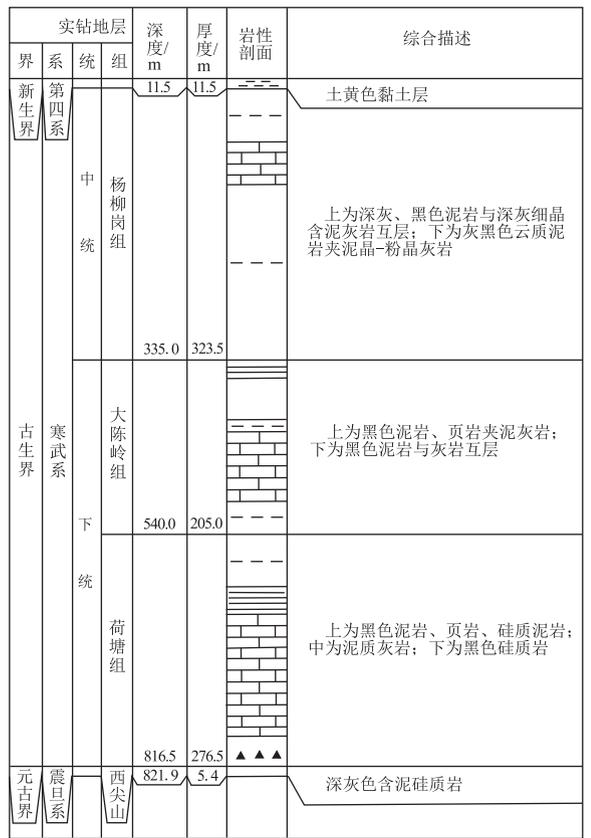


图 1 安徽皖宁 2 井地质柱状图

资料来源于中国石化华东分公司石油勘探开发研究院。

Fig.1 Stratigraphic section of well Wanning 2, Anhui Province

区 TOC 含量等值线图(图 2)可以看出,TOC 的高值区大致有 2 个条带:一条是江南隆起北缘九江—安庆—池州—宣城—湖州—苏州一带,其中心区域的含量超过 10% 以上;另一个条带位于钱塘拗陷的景德镇—黄山—杭州—嘉兴地区,其中心区域的有机碳平均含量超过 6% 以上。另外,在苏北盆地的泰州地区和滁州地区也有 TOC 平均含量超过 2% 的分布区。全区除铜陵、芜湖、马鞍山巢湖地区之外,其余绝大部分区域的有机碳平均含量均超过 1%,说明下扬子地区寒武系地层是页岩气理想的目标层系。

2.2 有机质类型

下扬子准地台早寒武世主要沉积浅海盆地相的灰黑、深灰色硅质岩、硅质页岩、页岩,夹石煤层和含磷结核层,通常见有黄铁矿小晶体,局部见有硅质灰岩和白云岩夹层^[7],说明寒武系地层为海相沉积地层,有机质主要来自于海洋生物,其类型应该为腐泥型。根据泥页岩样品分析结果,荷塘组干酪根碳同位素值均介于 -29‰~31‰ 之间,因此下寒武统荷塘组泥页岩的有机质类型应以 I 型为主^[3],这对页岩气的形成是十分有利的。

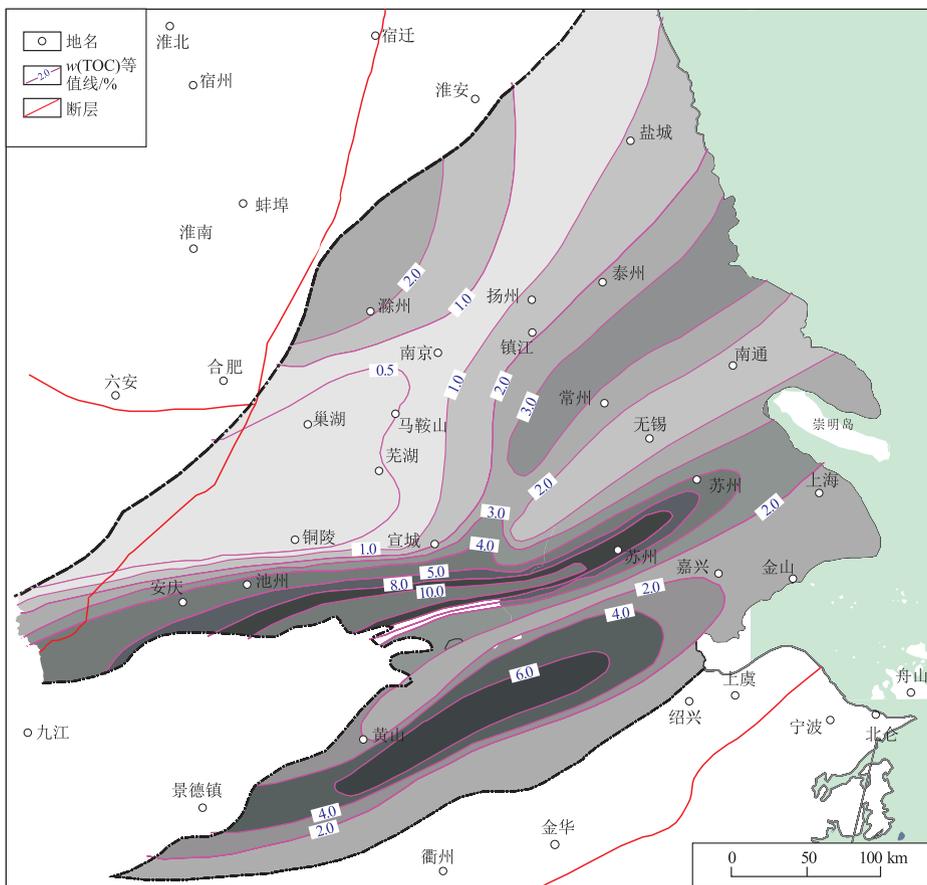


图 2 下扬子地区寒武系泥页岩 TOC 等值线

Fig.2 TOC contours of Cambrian shale, Lower Yangtze region

2.3 有机质热演化程度

寒武系地层至今已有五亿年的历史,成岩之后不仅经历了后期沉积地层的压实作用,而且还经历了多期次的构造运动和岩浆活动,其热演化程度相对较高,因此下扬子地区下寒武统泥页岩 R_o 普遍较高。从收集的前人 R_o 数据和研究工作中采集的样品分析成果来看(图 3),下扬子区荷塘组黑色泥页岩绝大部分地区的 $R_o > 2\%$,有一半以上的地区 $R_o > 3\%$,最高值可达 6.32%,处于过成熟干气阶段。在平面上,大的岩浆岩体周围其页岩的 R_o 值普遍较高,如安徽九华山岩体西侧的石台地区、江西三青山岩体北侧的婺源地区等;钱塘拗陷东南侧靠近江绍深大断裂带,岩体和火山活动十分强烈,因此其 R_o 值显示得较高,普遍大于 3.0%。分析认为,埋藏变质作用是导致下寒武统页岩高热演化的最主要原因之一,岩浆作用是导致下寒武统页岩局部高热演化的关键因素^[1,8]。2017 年在钱塘拗陷的开化地区采集测试的 31 件样品中, R_o 值在 2.10% ~ 3.44% 之间,其中一半以上的样品 $R_o < 3.0\%$;在花岗岩体出露的岩铺地区采集的 2 个样品, R_o 均超过 3.0%。由此可见,在钱塘拗陷的开化地区,荷塘组

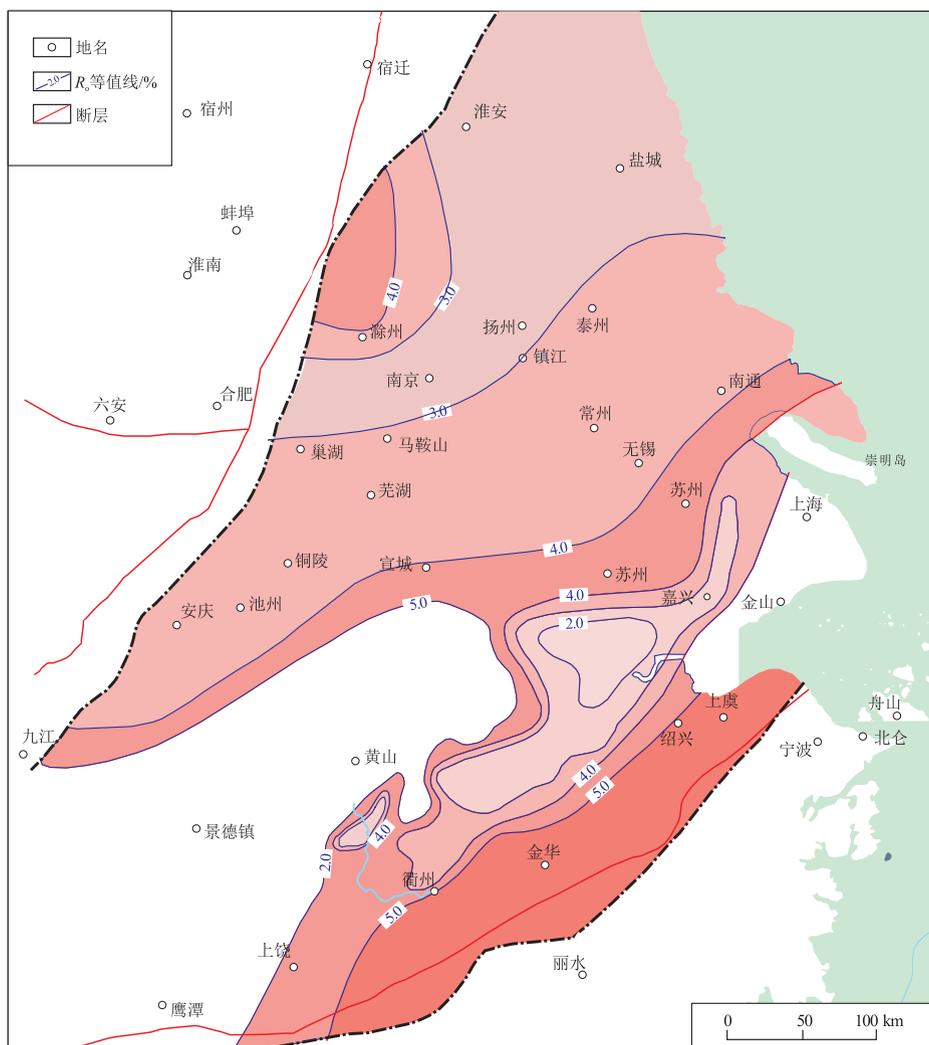
碳质页岩的热演化程度较适中,具有较好的页岩气勘探前景。

2.4 储集特征

根据所采样品扫描电镜分析显示,下寒武统页岩结构致密,基本上不发育无机孔隙,仅在有机质内部发育孔隙,大部分样品孔隙度小于 2%,孔隙度较低。据脉冲法实验结果显示,样品的孔隙度为 0.05% ~ 0.26%;样品进行氮气渗透率测试后显示,荷塘组泥页岩的渗透率为 $(0.026 \sim 0.049 2) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,为低孔低渗型,对吸附气的保存较为有利,但含气性相对较差。与国外页岩气的页岩相比,荷塘组泥页岩孔隙度明显较小,最大值仅 2.184%,渗透率最大值 $0.506 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;而采自未充填裂缝的荷塘组泥岩,最小孔隙度仅 0.198%,最小渗透率 $0.001 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。从采自含较少有机质的荷塘组泥岩中发现,所夹泥灰岩中缝合线发育,孔隙度也相对较大,一般为 1.2% ~ 1.5%^[8]。

2.5 含气性

宣页 1 井的钻探结果显示,目标层段荷塘组以硅质碳质泥页岩为主,TOC 大于 2%,最高达 7%;但从 49 件宣页 1 井的岩心样品现场含气量解析成

图3 下扬子地区寒武系荷塘组泥页岩 R_0 等值线平面分布Fig.3 R_0 contours of Cambrian shale, Lower Yangtze region

果来看,荷塘组泥页岩现场解析气最高含量为 0.26 mL/g,中寒武统大陈岭组解析气含量可达 0.67 mL/g^[9]。气测录井显示,目标层段全烃值升高并不明显,仅仅在下奥陶统泥灰岩段发现两处裂隙气的气测异常。另外,在荷塘组碳质页岩中显示全烃值有增高的趋势,但异常不够明显;现场岩心含气性测量结果,大部分碳质页岩样品含气量范围在 0.84~1.30 mL/g 之间^[9]。通过对泥页岩样品的等温吸附实验结果显示,泥页岩对气体的吸附量随着 TOC 的增加而呈现增大的趋势,而随着 R_0 值的增加(大于 3.0% 之后)而迅速减少^[8]。与中扬子宜昌地区目前已钻探的页岩气含量相比,尽管含量偏低,但宣页 1 井毕竟是处于下扬子热演化程度相对较高的地区,其 R_0 在 3.05%~3.67% 之间,构造复杂,钻探结果依然显示有页岩气的存在,并有一定的含气量,那么在 $R_0 < 3.0%$ 的地区,很显然具有页岩气的勘探潜力。

总体来说,下扬子地区下寒武统荷塘组泥页岩厚度大、TOC 高,但在热演化程度较高的地区,其储层物性较差,加之构造复杂、保存条件差,这是难以发现页岩气藏的主要原因;而在构造活动相对较弱、演化程度适中的地段,还是有发现页岩气藏的可能,因此寻找弱改造、低演化目标区是关键。

3 资源潜力分析

按照中国地质调查局颁布的《页岩气基础地质调查工作指南》,页岩气远景区优选指标为:(1)富有有机质页岩层段厚度应大于 15 m;(2)页岩的有机质含量大于等于 0.5%;(3)有机质热演化程度 $R_0 = 0.5\% \sim 3.5\%$;(4)埋深 500~4 500 m。

根据页岩气远景区优选指标,以下寒武统荷塘组硅质碳质页岩的厚度、有机质含量(TOC)、热演化程度(R_0)及目标层段的埋深等要素特征,采用地质类比,进行多因素叠加分析,从下扬子地区寒

武系富有机质泥页岩分布区域优选出页岩气远景区。优选出的远景区主要有 3 个：(1) 位于江西上饶—浙江开化、淳安、桐庐一带，富有机质泥页岩单层厚度在 30~150 m，TOC 都在 2% 以上，热演化程度相对较低， R_o 一般在 1.5%~3.5% 之间，泥页岩埋深 500~3 500 m；(2) 分布在江苏扬州—高邮—兴化一带^[10]，该区有机质丰度高，大部分地区 TOC 大于 2.5%， R_o 一般在 2.0%~3.0% 之间，说明热演化程度较低，泥页岩埋藏深度一般都大于 3 000 m；(3) 分布在苏北盆地西南部，位于安徽全椒县—江苏六合县境内^[10]，该区有机质丰度高，全椒地区露头下寒武统泥岩有机碳平均含量为 5.67%， R_o 在 3% 左右，有机质热演化程度较高，泥页岩埋深西高东低，埋深适中，一般为 2 000~3 000 m。

通过露头测量、钻井资料获得下扬子区内不同位置的厚度值并编制页岩分布等厚图，使用相对面积占有法，即将编制好的有效页岩等厚图作为厚度估计的直接依据，依照不同厚度所占据的相对面积大小进行厚度估计和赋值，估算求得下扬子地区下寒武统页岩气资源量为 $288\ 944.4 \times 10^8\ m^3$ 。

4 结论

(1) 通过大量的野外露头观察发现，下扬子区下寒武统荷塘组暗色泥岩在区内分布稳定、厚度较大，有机碳含量高、有机质类型以 I 型为主，处于过成熟热演化阶段，具有良好的页岩气成藏条件。

(2) 下寒武统荷塘组碳质泥岩 R_o 普遍较高，大都大于 2%，处于过成熟干气阶段，所以演化程度适中的地区是寻找页岩气的有利地区。

(3) 下寒武统荷塘组碳质泥岩热演化程度较高，储层物性、保存条件差是页岩含气量低的主因，因此针对下寒武统页岩，寻找弱改造、低演化程度区是勘探的关键。

参考文献：

[1] 夏在连,花彩霞,刘计勇,等.下扬子区下古生界油气有利勘探区带探讨[J].海洋地质与第四纪地质,2018,38(3):66-74.
XIA Zailian, HUA Caixia, LIU Jiyong, et al. Favorable Lower Paleozoic exploration targets in the Lower Yangtze region[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2018, 38(3): 66-74.

[2] 徐曦,朱晓颖,单希鹏,等.下扬子区中新代沿江盆地群的盆地结构与沉积特征[J].石油实验地质,2018,40(3):303-314.
XU Xi, ZHU Xiaoying, SHAN Xipeng, et al. Structure and sedi-

mentary characteristics of the Meso-Cenozoic basin group along the Yangtze River in the Lower Yangtze region[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(3): 303-314.

[3] 徐楠,徐曦,周波,等.下扬子区新生代构造变形物理模拟及其主控因素[J].石油实验地质,2017,39(3):409-416.
XU Nan, XU Xi, ZHOU Bo, et al. Physical simulation of Cenozoic tectonic deformation in the Lower Yangtze region and its main controlling factors[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2017, 39(3): 409-416.

[4] 袁勇,陈建文,梁杰,等.海陆对比看南黄海海相中-古生界的生储盖组合特征[J].石油实验地质,2017,39(2):195-202.
YUAN Yong, CHEN Jianwen, LIANG Jie, et al. Source-reservoir-seal assemblage of marine Mesozoic-Paleozoic in South Yellow Sea Basin by land-ocean comparison[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2017, 39(2): 195-202.

[5] 赵立鹏,王冉,钟方军,等.赣东北重点泥页岩层系地球化学特征分析[J].特种油气藏,2017,24(1):64-69.
ZHAO Lipeng, WANG Ran, ZHONG Fangjun, et al. Geochemistry features of key mud shale formations in Northeast Jiangxi Province[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2017, 24(1): 64-69.

[6] 曹涛涛,邓模,罗厚勇,等.下扬子地区中上二叠统页岩有机孔发育特征[J].石油实验地质,2018,40(3):315-322.
CAO Taotao, DENG Mo, LUO Houyong, et al. Characteristics of organic pores in Middle and Upper Permian shale in the Lower Yangtze region[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(3): 315-322.

[7] 安徽省地质矿产局区域地质调查队.安徽地层志:前寒武系分册[M].合肥:安徽科学技术出版社,1985.
Regional Geological Survey Team of Anhui Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources. Stratigraphic records of Cambrian in Anhui[M]. Hefei: Anhui Science and Technology Press, 1985.

[8] 张飞燕.下扬子地区下寒武统页岩特征及有利勘探方向探讨[J].中国煤炭地质,2017,29(1):25-30.
ZHANG Feiyan. Discussion on Lower Cambrian shale features and favorable exploration orientation in Lower Yangtze area[J]. Coal Geology of China, 2017, 29(1): 25-30.

[9] 吴浩.安徽省扬子地层区古生界页岩气地质条件与勘探前景[D].南京:南京大学,2014.
WU Hao. The Paleozoic shale gas geological condition and prospect in Yangzi stratum area, Anhui Province[D]. Nanjing: Nanjing University, 2014.

[10] 刘小平,潘继平,刘东鹰,等.苏北地区下寒武统幕府山组页岩气勘探前景[J].成都理工大学学报(自然科学版),2012,39(2):198-205.
LIU Xiaoping, PAN Jiping, LIU Dongying, et al. Shale-gas exploration prospect of Lower Cambrian Mufushan Formation in the northern Jiangsu, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition), 2012, 39(2): 198-205.

(编辑 徐文明)