

下扬子地区下寒武统黑色页岩地球化学特征

朱庆杰¹, 侯鹏飞¹, 杨帅帅², 郭海莹³, 马磊¹, 张涛¹, 任瑞¹

1. 常州大学石油工程学院, 常州 213016
2. 中国石化江苏连云港石油分公司, 连云港 222000
3. 滨州学院资源环境系, 滨州 256600

摘要 通过露头观测、样品采集、有机地化分析等方法, 研究了下扬子地区下寒武统黑色页岩的地质特征与油气资源意义。研究表明, 黑色页岩沉积厚度大, 主要分布在皖南的石台—泾县—宁国、全椒、苏北的高邮—海安地区, 厚度介于100~400 m; 岩石矿物成分中石英含量较高, 有利于页岩的压裂改造; 有机碳含量主要分布在1.0%~4.0%, 黑色页岩沉积厚度中心有机碳含量普遍大于2.0%; 有机显微组成、干酪根碳同位素、Pr/Ph比值和饱和芳比表明, 该页岩有机质类型为I型, 母质来源为低等浮游生物, 具有较强生烃潜力; 热演化程度较高, 等效镜质体反射率主体分布在2.0%~4.0%, 普遍处于高成熟—过成熟阶段。综合认为, 该区黑色页岩沉积厚度大、有机碳含量较高、有机质类型好、热演化程度高, 具备页岩气形成的地质条件, 是中国南方页岩气有利勘探区块之一。

关键词 下寒武统; 黑色页岩; 地球化学特征; 下扬子地区

中图分类号 P618

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.13.002

Geochemical characteristics of black shale of the lower Cambrian in lower Yangtze area

ZHU Qingjie¹, HOU Pengfei¹, YANG Shuaishuai², GUO Haiying³, MA Lei¹, ZHANG Tao¹, REN Rui¹

1. School of Petroleum Engineering, Changzhou University, Changzhou 213016, China
2. Sinopec Jiangsu Lianyungang Oil Company, Lianyungang 222000, China
3. Resources and Environment Department of Binzhou University, Binzhou 256600, China

Abstract The geologic characteristics and their hydrocarbon implication of black shale of the lower Cambrian in lower Yangtze area are analyzed by outcrop observation, sampling and geochemical analysis. The following conclusions are drawn. The black shale of lower Cambrian in lower Yangtze area has great thickness between 100 to 400 meters, and is mainly distributed in Shitai, Jingxian, Ningguo, Quanjiao, Gaoyou and Hai'an. It has high content of quartz in the mineral composition in this set of black shale, which is good for fracturing. The content of organic carbon ranges from 1% to 4% in lower Yangtze area, and is greater than 2.0% at depositional thickness center. The analysis of microscopic organic composition, carbon isotope of kerogen, Pr/Ph and saturated HC/aromatic HC indicate that the kerogen type is I. The origin of parent materials is aquatic organisms with high potential for hydrocarbon generation. The vitrinite reflectance is in the range of 2.0%~4.0%, in the stage of maturity to over-maturity. The black shale of lower Cambrian in lower Yangtze area has great thickness, high content of organic carbon, good kerogen type and high thermal maturity, which suggests promising exploration prospects.

Keywords lower Cambrian; black shale; geochemical characteristics; lower Yangtze area

收稿日期: 2015-03-12; 修回日期: 2015-04-17

基金项目: 中国-波兰政府间科技合作项目(2012-35-5); 江苏省教育科学“十二五”规划项目(D/2013/01/130); 江苏政府留学奖学金(JS-2013-326); 常州大学科技项目(ZMF1102071)

作者简介: 朱庆杰, 教授, 研究方向为油气田地质开发, 电子信箱: qjzhu@cczu.edu.cn

引用格式: 朱庆杰, 侯鹏飞, 杨帅帅, 等. 下扬子地区下寒武统黑色页岩地球化学特征[J]. 科技导报, 2015, 33(13): 17-21.

下扬子地区一般指长江下游,被郟庐断裂和江绍断裂分割成的大型沉积盆地^[1],面积 $22.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。古生代早期,扬子地区成为稳定的克拉通边缘海沉积盆地^[2,3]。早寒武世,下扬子地区总体为由北向南的平缓斜坡,海水从西南方向侵入^[4],大部分地区演变为陆棚沉积环境。此时下扬子地区处于南东低、北西高的沉积古地貌格局,自南向北依次划分为盆地相、局限台地相和深水陆棚相。

中国南方海相地层是油气勘探潜力层系^[5-8],其中下寒武统黑色页岩是获得突破的重点层位^[9-13]。目前对下扬子地区黑色页岩的油气资源已有一定的认识。王阳等^[13]认为早寒武世缺氧还原的沉积环境有利于页岩储层的发育;潘继平等^[9]认为下扬子古生界暗色泥页岩具有厚度大,有机碳含量高和热演化程度高等特点;陈桂华等^[10]认为下寒武统页岩脆性度大,具有较好的可压裂性。通过对幕府山、青阳青坑、石台丁香、黄柏山等下寒武统黑色页岩剖面(剖面位置如图1所示,本文中地图源自文献[9])的露头观测、取样分析,结合常规油气勘探积累的资料,研究下寒武统黑色页岩厚度与分布、结构构造、岩石矿物组成、有机质丰度、有机质类型、热演化程度等,探讨研究区油气资源潜力。

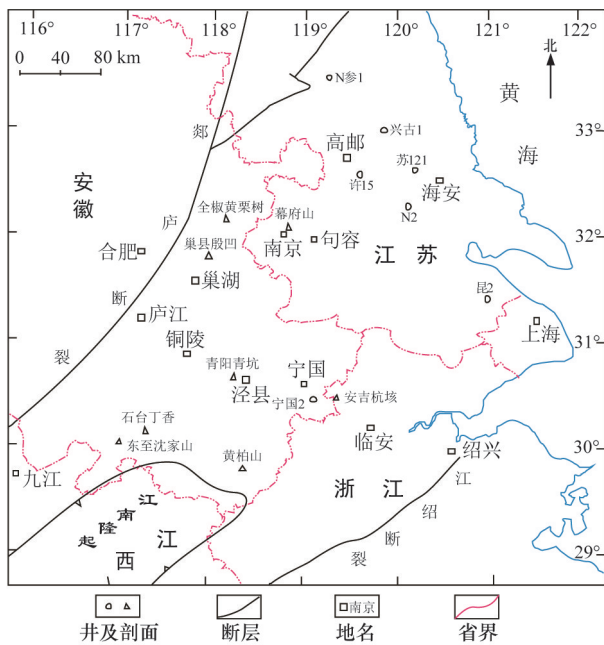


图1 下扬子地区下寒武统剖面与井位位置

Fig. 1 Geological section and well location of lower Cambrian in lower Yangtze area

1 黑色页岩地质特征

1.1 黑色页岩分布及结构构造

下扬子地区下寒武统黑色页岩主要分布在荷塘组(江苏地区称之为幕府山组),下部岩性以黑灰色、黑色页岩为主,页理较发育,局部夹黑色碳质页岩、石煤层,含星点状黄铁矿,呈现不等厚状互层;中上部以白云岩为主,夹透镜状泥质

岩。黑色页岩受江南隆起、郟庐断裂和江绍断裂的影响,整体呈现北东向带状展布。因构造位置与沉积环境差异,自南向北黑色页岩沉积厚度变化较大。皖南—浙西北盆地相区的黑色页岩沉积厚度分布在200~400 m,其中石台、泾县、宁国一带为黑色页岩的沉积中心,厚度分布在300~400 m,最大厚度为622 m;皖南全椒、苏北高邮—海安地区的深水陆棚区黑色页岩厚度分布在100~200 m,最大厚度363 m(图2);巢湖—句容以南至庐江—南通以北的局限台地相区的黑色页岩基本不发育。

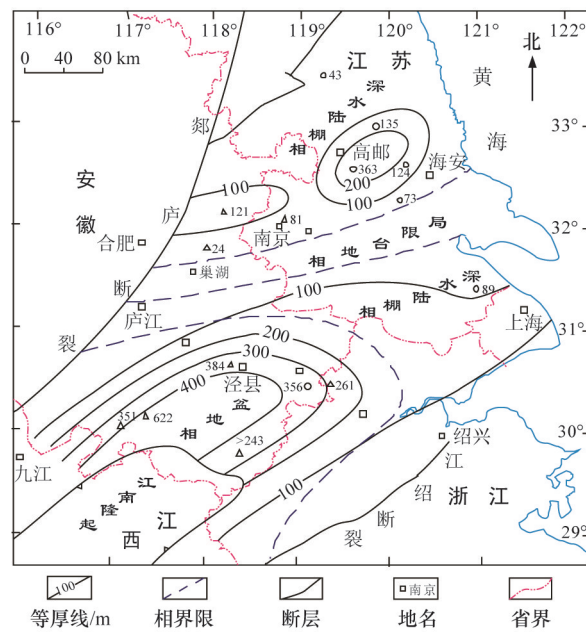


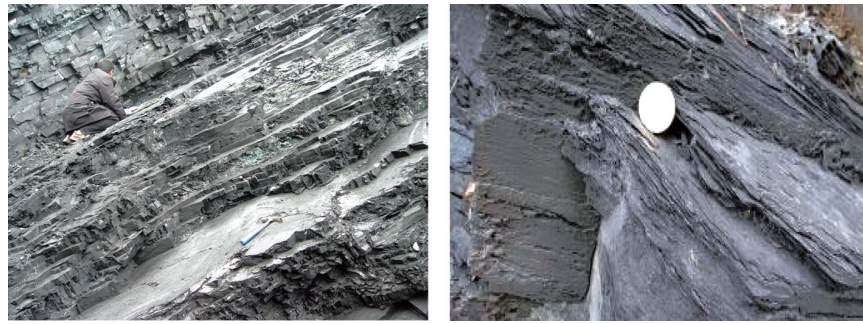
图2 下扬子地区下寒武统黑色页岩厚度与沉积

Fig. 2 Thickness and sedimentation of black shale of lower Cambrian in lower Yangtze area

黑色页岩沉积厚度大,含有丰富的化石,沉积构造有水平、平行层理,纹层状韵律结构较明显(图3)。古生物以三叶虫、腹足类为主。黑色页岩中有串珠状磷结核分布,呈球形、椭圆形、透镜状等,直径一般小于10 cm,细碎屑自下往上减少,说明其沉积于滞留缺氧的环境。

1.2 矿物组成

下扬子地区下寒武统黑色页岩矿物成分较复杂,由石英、黏土、钾长石、斜长石、方解石、白云石和黄铁矿组成(图4)。页岩矿物中石英体积分数分布在24.7%~38.6%,平均为35%,多为粉砂级,呈现层状分布在页岩中,分选性较好;黏土体积分数分布在38.0%~53.5%,平均为46%,主要成分为伊利石;钾长石和斜长石体积分数主要分布在4.2%~11.8%;方解石体积分数分布在5%~13%;黄铁矿的体积分数分布在1.8%~3.8%。由于早寒武世沉积环境的差异,矿物组成虽不相同,但页岩脆性矿物整体含量较高,在压裂过程中产生微裂缝的能力较强,具备较大的压裂改造空间,有利于页岩气的开



(a) 安徽休宁蓝田采石场

(b) 宁国市关岭省道边

图3 下扬子区下寒武统页岩露头

Fig. 3 Outcrop of black shale of lower Cambrian in lower Yangtze area

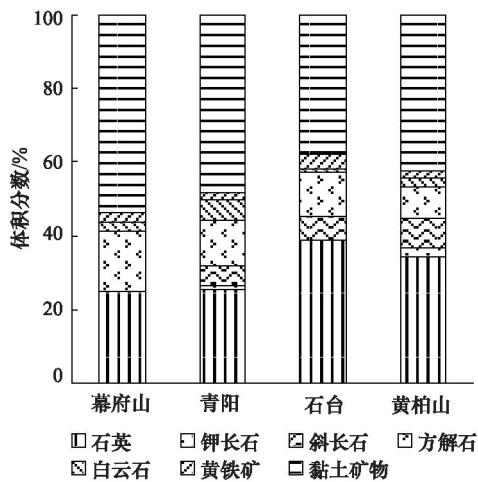


图4 下扬子地区下寒武统黑色页岩矿物成分
Fig. 4 Mineral components of black shale of lower Cambrian in lower Yangtze area

采。全区矿物成分中均含部分黄铁矿,表明黑色页岩沉积于缺氧还原环境,有利于有机质的富集和保存。

2 地球化学特征

2.1 有机质丰度

有机碳含量(total organic carbon, TOC)常作为评价黑色页岩有机质丰度的指标^[14-16]。下扬子地区下寒武统黑色页岩有机碳含量最大值为9.93%,最小值为0.2%,平均值高达2.67%,有机碳含量高于2%的样品占52.94%(图5)。平面上,有机碳含量较高的地区主要分布在黑色页岩沉积厚度中心。皖南—浙西北一带普遍超过2.0%,局部地区大于4%(图6)。沿江以北的安徽全椒、苏北的高邮—海安一带有机碳含量主要分布在1.0%~3.0%,黄栗树和苏121井有机碳分别高达4.7%和3.4%,为优质烃源岩,具有较强生烃能力,具备页岩气形成的物质基础。

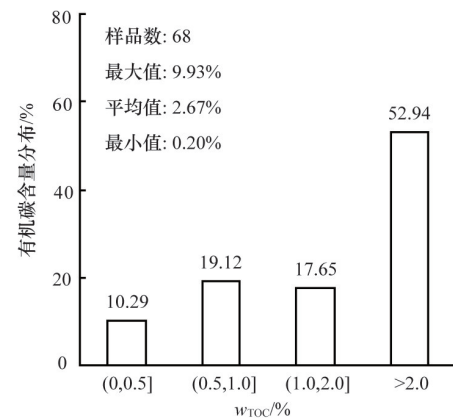


图5 下扬子地区下寒武统黑色页岩有机碳分布

Fig. 5 Organic carbon distribution of black shale of lower Cambrian in lower Yangtze area

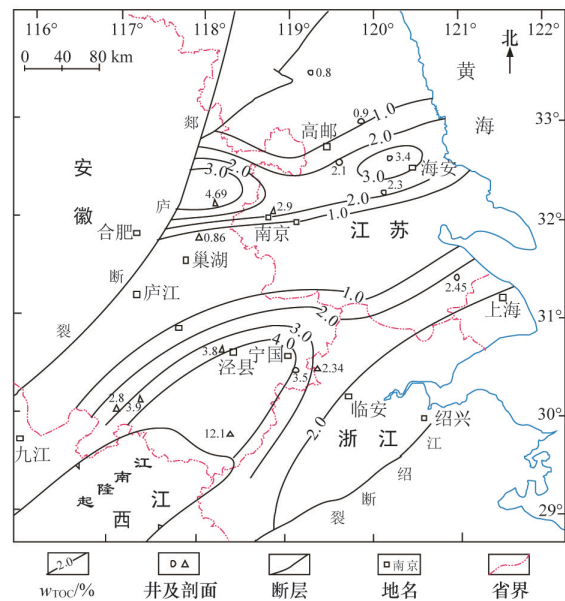


图6 下扬子地区下寒武统黑色页岩有机碳平面分布

Fig. 6 Organic carbon distribution profile of black shale of lower Cambrian in lower Yangtze area

2.2 有机质类型

干酪根显微组分、碳同位素、姥鲛烷/植烷比值(Pr/Ph)与饱芳比可以判断有机质类型。干酪根碳同位素小于-2.9‰, Pr/Ph 比值小于1, 饱芳比大于3为 I 型; 干酪根碳同位素介于-2.9‰~-2.6‰, Pr/Ph 比值介于1~3, 饱芳比分布在0.5~0.8为 II 型^[17-20]。下扬子地区下寒武统黑色页岩干酪根显微组分以腐泥组为主, 含量分布在63%~92%, 平均值为88%, 镜质组和惰质组相对较少, 一般小于10%, 类型指数 TI 介于85~96。通过下扬子地区21件样品的测试分析, 页岩干酪根碳同位素值除3件样品大于-2.9‰外, 其余均在-2.95‰~-3.76‰(图7), 平均为-3.3‰, Pr/Ph 在0.41~0.83, 饱芳比分布在2.6~10.2。综合认为下扬子地区下寒武统黑色页岩有机质主要为 I 型, 主要来源于海洋浮游生物。

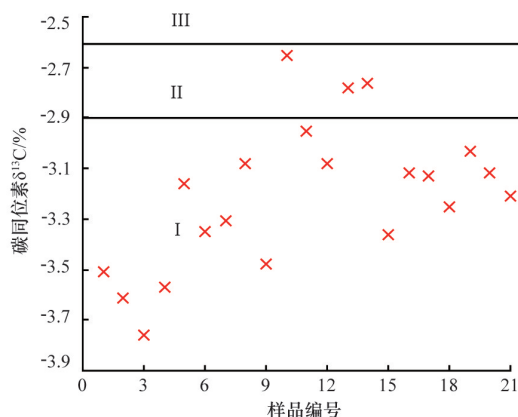


图7 下扬子地区下寒武统黑色页岩干酪根碳同位素分布
Fig. 7 Distribution of carbon isotope of black shale of lower Cambrian in lower Yangtze area

2.3 有机质成熟度

黑色页岩成熟度如图8所示。

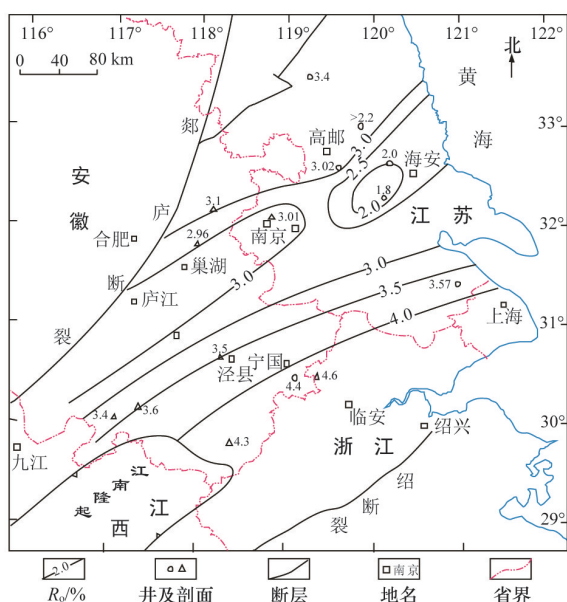
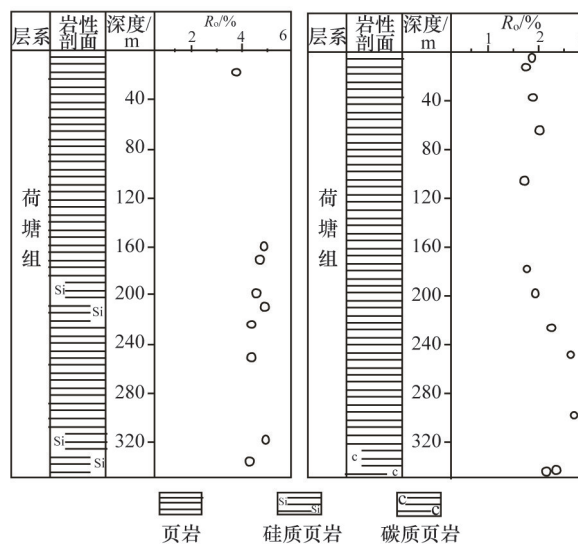


图8 下扬子地区下寒武统黑色页岩成熟度平面分布
Fig. 8 Thermal maturity of black shale of lower Cambrian in lower Yangtze area

平面上, 皖南—浙西北一带等效镜质体反射率(R_o)值分布在3.0%~4.0%, 如青阳青坑、石台丁香、东至沈家山剖面实测 R_o 值分别为3.5%、3.6%和3.4%, 部分地区大于4.0%。苏北地区 R_o 值主要分布在2.0%~3.0%, 如苏121井和N2井分别为2.0%、1.8%, 处于高成熟-过成熟阶段。纵向上, R_o 值从上往下逐渐增高, 石台丁香、安吉杭垓剖面主要分布在2.0%~4.8%(图9)。可知, 下扬子地区下寒武统黑色页岩整体处于高成熟-过成熟热演化阶段。



(a) 石台 (b) 安吉

图9 下扬子地区下寒武统成熟度纵向分布
Fig. 9 Vertical distribution of thermal maturity of lower Cambrian in lower Yangtze area

3 结论

- 1) 下扬子地区下寒武统发育盆地相和深水陆棚相黑色页岩, 受大地构造与沉积环境的控制, 主要分布在沿江两侧皖南—浙西北和苏北地区, 厚度主体介于100~400 m。
- 2) 页岩矿物成分中石英含量整体较高, 有利于进行压裂改造; 全区矿物成分中均含部分黄铁矿, 表明黑色页岩沉积于缺氧还原环境, 有利于有机质的富集和保存。
- 3) 黑色页岩有机碳含量分布在1.0%~4.0%, 属于优质烃源岩。有机质类型为 I 型, 母质来源为低等浮游生物。 R_o 值主体在2.0%~4.0%, 处于高成熟-过成熟阶段。总之, 黑色页岩厚度较大、有机碳含量高、有机质类型好和热演化成熟度高, 具备开展页岩气勘探的资源基础。

参考文献 (References)

- [1] 郭念发, 刘德法, 尤效忠. 下扬子区古生界油气地质条件及勘探选区[J]. 石油勘探与开发, 1998, 25(1): 1-7.
Guo Nianfa, Liu Defa, You Xiaozhong. Palaeozoic oil and gas geological conditions and exploration area screening in Lower Yangtze region[J]. China Petroleum Exploration, 1998, 25(1): 1-7.
- [2] 张欣国. 扬子区寒武系沉积相分布及其特征[J]. 石油实验地质, 1993,

- 15(4): 350-360.
Zhang Xinguo. The distribution of sedimentary facies in the Cambrian system of the Yangtze area[J]. *Experimental Petroleum Geology*, 1993, 15(4): 350-360.
- [3] 文玲, 胡书毅, 田海芹, 等. 扬子地区寒武系烃源岩研究[J]. *西北地质*, 2001, 34(2): 67-74.
Wen Ling, Hu Shuyi, Tian Haiqin, et al. A study on hydrocarbon source rock of Cambrian in Yangtze area[J]. *Northwestern Geology*, 2001, 34(2): 67-74.
- [4] 胡书毅, 马玉新, 田海芹, 等. 扬子地区寒武系油气藏地质条件[J]. *石油大学学报: 自然科学版*, 1999, 23(4): 20-25.
Hu Shuyi, Ma Yunxin, Tian Haiqin, et al. Favourable conditions for oil and gas generation in the Cambrian of Yangzi area[J]. *Journal of the University of Petroleum: Natural Science Edition*, 1999, 23(4): 20-25.
- [5] 陈安定, 黄金明, 杨芝文, 等. 皖南—浙西下古生界碳沥青成因及南海相“有效烃源岩”问题探讨[J]. *海相油气地质*, 2004, 9(1): 77-83.
Chen Anding, Huang Jiming, Yang Zhiwen, et al. Discussions on origin of carbonaceous asphalt in lower Paleozoic strata in southern Anhui and western Zhejiang and on marine efficiency source rocks in southern China [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2004, 9(1): 77-83.
- [6] 沃玉进, 肖开华, 周雁, 等. 中国南方海相层系油气成藏组合类型与勘探前景[J]. *石油与天然气地质*, 2006, 27(1): 11-16.
Wo Yujin, Xiao Kaihua, Zhou Yan, et al. Types of marine plays in southern China and exploration prospects[J]. *Oil & Gas Geology*, 2006, 27(1): 11-16.
- [7] 沃玉进, 周雁, 肖开华, 等. 中国南方海相层系埋藏史类型与生烃演化模式[J]. *沉积与特提斯地质*, 2007, 27(3): 94-100.
Wo Yujin, Zhou Yan, Xiao Kaihua, et al. The burial history and models for hydrocarbon generation and evolution in the marine strata in southern China[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2007, 27(3): 94-100.
- [8] 沃玉进, 汪新伟, 袁玉松, 等. 中国南方海相层系油气保存研究的新探索——“保存系统”的概念与研究方法[J]. *石油实验地质*, 2011, 33(1): 66-73, 86.
Wo Yujin, Wang Xinwei, Yuan Yusong, et al. New explorations of petroleum preservation conditions in marine sequences, South China[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2011, 33(1): 66-73, 86.
- [9] 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): 337-343.
Pan Jiping, Qiao Dewu, Li Shizhen, et al. Shale gas geological conditions and exploration prospect of the Paleozoic marine strata in Lower Yangtze area, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(2): 337-343.
- [10] 陈桂华, 祝彦贺, 徐强, 等. 页岩气成藏的四性特征及对下扬子地区页岩气勘探的启示[J]. *中国石油勘探*, 2012, 17(5): 63-70.
Chen Guihua, Zhu Yanhe, Xu Qiang, et al. Four Characteristics of shale gas play and enlightenment to shale gas exploration in Lower Yangtze area[J]. *China Petroleum Exploration*, 2012, 17(5): 63-70.
- [11] 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 [J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition*, 2012, 39(2): 198-205.
- [12] 黄保家, 施荣富, 赵幸滨, 等. 下扬子皖南地区古生界页岩气形成条件及勘探潜力评价[J]. *煤炭学报*, 2013, 38(5): 877-882.
Huang Baojia, Shi Rongfu, Zhao Xingbin, et al. Geological conditions of Paleozoic shale gas formation and its exploration potential in the south Anhui of Lower Yangtze area[J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(5): 877-882.
- [13] 王阳, 陈洁, 胡琳, 等. 沉积环境对页岩气储层的控制作用—以中下扬子区下寒武统筇竹寺组为例[J]. *煤炭学报*, 2013, 38(5): 845-850.
Wang Yang, Chen Jie, Hu Lin, et al. Sedimentary environment control on shale gas reservoir: A case study of lower Cambrian Qiongzhusi Formation in the middle Lower Yangtze area[J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(5): 845-850.
- [14] Curtis J B. Fractured shale gas systems[J]. *AAPG Bulletin*, 2002, 86(11): 1921-1938.
- [15] 陈安定. 海相“有效烃源岩”定义及丰度下限问题讨论[J]. *石油勘探与开发*, 2005, 32(2): 23-25.
Chen Anding. Definition and abundance threshold of marine source rocks developed in south China[J]. *China Petroleum Exploration*, 2005, 32(2): 23-25.
- [16] Bowker K A. Barnett shale gas production, Fort Worth Basin: Issues and discussion[J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91(4): 523-533.
- [17] 李从玲. 近代海洋沉积物(层)中姥鲛烷/植烷比值及其地球化学意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1990, 10(4): 77-88.
Li Congling. Pristne/Phytane ratio in recent marine sediment (sedimentary layer) and its geochemical significance[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1990, 10(4): 77-88.
- [18] 李任伟, 卢家烂, 张淑坤, 等. 震旦纪和早寒武世黑色页岩有机碳同位素组成[J]. *中国科学: D辑*, 1999, 29(4): 351-357.
Li Renwei, Lu Jianguan, Zhang Shukun et al. Organic carbon isotopic composition in Sinian and early Cambrian black shale[J]. *Science in China: Series D*, 1999, 29(4): 351-357.
- [19] 付修根, 王剑, 汪正江, 等. 藏北羌塘盆地胜利河油页岩干酪根特征及碳同位素指示意义[J]. *地球学报*, 2009, 30(5): 643-650.
Fu Xiugen, Wang Jian, Wang Zhengjiang, et al. Characteristics of kerogens and their carbon isotope implications for the Shengli River Oil shale in Qiangtang Basin, northern Tibet[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2009, 30(5): 643-650.
- [20] 梁狄刚, 郭彤楼, 陈建平, 等. 中国南方海相生烃成藏研究的若干新进展(二): 南方四套区域性海相烃源岩的地球化学特征[J]. *海相油气地质*, 2009, 14(1): 1-15.
Liang Digang, Guo Tonglou, Chen Jianping, et al. Geochemical characteristics of four suits of region marine source rocks, south China [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2009, 14(1): 1-15.

(编辑 田恬)

《科技导报》征集“封面文章”

为快速反映中国最新科技研究成果,《科技导报》拟利用刊物最显著位置——封面将最新科研成果第一时间予以突出报道。来稿要求:研究成果具创新性或新颖性;反映该领域中国乃至世界前沿研究水平;可以图片形式予以反映,图片美观、清晰、分辨率超过300dpi;文章篇幅不限,要说明研究的背景、方法、取得的结果,以及结论。在线投稿:www.kjdb.org。