

下扬子地区古生界页岩气地质条件与勘探前景

潘继平¹, 乔德武¹, 李世臻¹, 周东升², 许林峰², 张梦颖², 宋修艳²

PAN Ji-ping¹, QIAO De-wu¹, LI Shi-zhen¹, ZHOU Dong-sheng²,

XU Lin-feng², ZHANG Meng-ying², SONG Xiu-yan²

1. 国土资源部油气资源战略研究中心, 北京 100034;

2. 中国地质大学(北京)海洋学院, 北京 100083

1. *Stratigic Research Center of Oil and Gas Resources, Ministry of Land & Resources, Beijing 100034, China;*

2. *Marinescience School of China University of Geoscience, Beijing 100083, China*

摘要:通过对下扬子地区海相古生界暗色泥页岩发育的构造背景、沉积环境、空间展布、地球化学参数等的分析, 认为下扬子地区海相古生界暗色泥页岩具备了页岩气富集的基本条件, 提出了2套重点目的层, 即下寒武统荷塘组 and 上二叠统龙潭组, 并针对这2套泥页岩发育的层位分别提出了有利勘探区。同时认为, 后期改造相对较弱的地区应该是页岩气勘探开发的主战场。

关键词:下扬子; 古生界; 海相地层; 页岩气

中图分类号: P534.4; P618.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2552(2011)02/03-0337-07

Pan J P, Qiao D W, Li S Z, Zhou D S, Xu L F, Zhang M Y, Song X Y. Shale-gas geological conditions and exploration prospect of the Paleozoic marine strata in lower Yangtze area, China. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(2/3):337-343

Abstract: Based on studies of tectonic setting, sedimentary environment, spatial distribution and geochemistry parameters of Paleozoic marine mudstone and shale in Yangtze area, the paper suggests that the black mudstone and shale have basic geological conditions for shale-gas occurrence and accumulations, and puts forward two sets of significance exploration stratum, viz Hetang Formation of Lower Cambrian and Longtan Formation of Upper Permian and suggests the favorable exploration area, respectively. The weakness area of tectonics deformation and structural destruction, with great potential of shale gas resource, should be priority of shale gas exploration and development in the lower Yangtze area.

Key words: lower Yangtze area; Paleozoic; marine strata; shale-gas

国内页岩气勘探工作刚刚起步, 尽管相关部门和学者已开展了页岩气的地质调查与研究, 但主要集中在上扬子地区^[1-2], 对于海相泥页岩同样发育的下扬子地区, 则缺乏相应的调查与研究。基于常规油气的勘探, “六五”、“七五”计划以来, 国土资源部(原地质矿产部)、中国石化、中国石油等相关部门围绕下扬子地区海相烃源岩相继做了大量工作。研究表明, 下扬子地区古生界富有机质泥页岩分布较广泛, 有机碳(TOC)含量较高^[3-4], 具备雄厚的成

烃物质基础。因此开展下扬子地区页岩气的地质条件研究具有重要的理论和现实意义。

1 区域地质概况

下扬子地区是指扬子准地台在长江下游地段内的范围, 东和东北到海边, 西和西北以郯庐深断裂与华北板块为界, 西南到江西九江与中扬子地区相连, 南和东南以江绍深断裂与华夏板块为界^[5-7], 跨越江、浙、皖、赣、沪四省一市, 面积约 22.5×10⁴km²(图 1)。

收稿日期: 2010-11-30; 修订日期: 2011-01-06

资助项目: 国土资源部油气专项《中国重点地区页岩气资源潜力及有利区带优选》(编号: 2009GYXQ15-6)

作者简介: 潘继平(1970-), 男, 博士, 研究员, 从事石油地质和油气资源战略选区评价工作。E-mail: panjiping@263.net

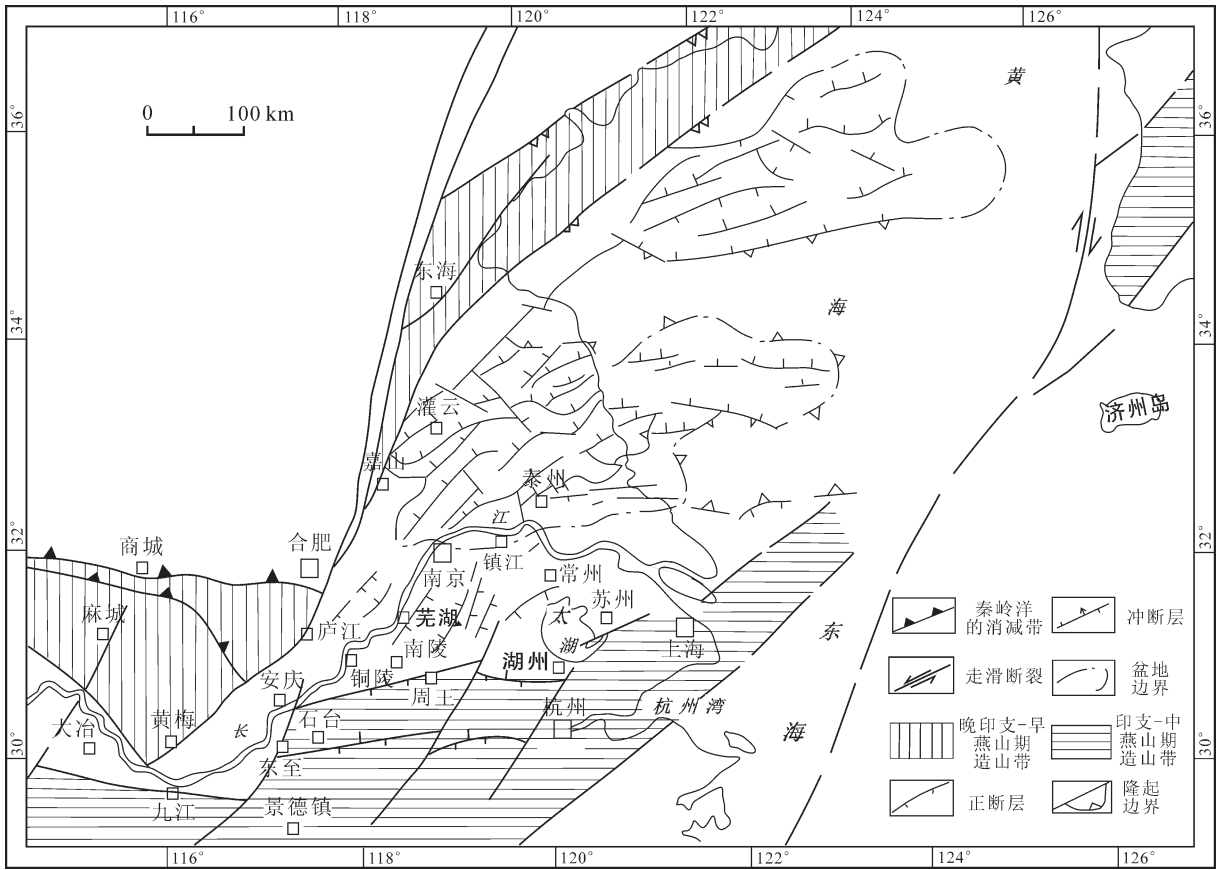


图1 下扬子地块大地构造位置

Fig. 1 Tectonic position of the lower Yangtze block

中、新生代,伴随多期次的强烈构造运动,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。

1.1 构造演化

下扬子地区的构造演化大致可以分为以下5个阶段:①太古宙古陆块形成期。由散布在赤道附近区域众多的硅铝质(或花岗岩质)块体逐渐聚合成大小不等的古陆核。本区分布有以南黄海古陆核为中心的古陆核群,并形成了酷似上地壳最底部的深变质岩系^[5,7]。②元古宙扬子板块和南方古陆形成期。中元古代江南俯冲、碰撞带的形成标志着扬子板块完成了南北的拼接^[8]。水涛^[9]最先提出扬子与华夏板块在晋宁期(即青白口纪)于绍兴-十万大山带发生碰撞作用。Xian-hua Li等^[10]的研究表明,华夏与扬子陆块在880 Ma前后最终拼合形成统一的华南大陆。③早古生代到早、中三叠世海相沉积期。此时期扬子板块比较稳定,加里东运动影响较小,沉积厚度

大(3000~10000m)^[8],下扬子部分地区沉积厚度可达上万米。④中生代印支-燕山运动期。南方大陆在印支期向华北板块俯冲拼接,碰撞拼接以后,海水全面退出,下扬子地区从此进入陆相盆地的发展阶段,同时形成一套晚三叠世—侏罗纪的类前陆盆地相。⑤新生代喜马拉雅构造期。随着亚欧大陆与印度次大陆的碰撞,以及西太平洋岛弧边缘海的出现、拉伸为主-挤压为辅的交替改造、大型拗陷与断-拗复合型盆地叠加^[11],现今的构造面貌基本形成。

1.2 地层与沉积特征

下扬子地区地层系统较复杂,根据岩相和生物组合的差异,可进一步将其划分成3个地层区,即下扬子地层区、江南地层区和沪杭地层区。

下扬子地区古生界海相主要发育于深水陆棚相(陆表海)环境,是一个自震旦纪以来长期接受沉积的区域。地层发育良好,震旦纪—中二叠世为海相沉积,晚三叠世以后多为陆相沉积。根据目前下扬子地

区页岩气勘探的重点层位,简要介绍下扬子地区古生界及其沉积特征。

(1)震旦系:震旦系可划分为莲沱组、南沱组、陡山沱组和灯影组。下扬子地区灯影组主要分布在都昌—休宁、无为、江山—绍兴等地区,为陆棚、滨海和台地沉积,主要为碳酸盐岩和硅质泥岩。

(2)寒武系:下扬子地区寒武系可划分为荷塘组/幕府山组、炮台山组和观音台组。荷塘组分布广,占据整个皖南和浙西地区,以硅质岩、黑色泥页岩和炭质页岩为主,为深水盆地相沉积。中、上寒武统炮台山组、观音台组分布范围相对局限,为开阔台地—局限台地相沉积,以灰色白云岩、云质灰岩为主。

(3)奥陶系:奥陶系进一步划分为苍山组、红花园组、大湾组、牯牛潭组、宝塔组、汤山组、汤头组和五峰组。其中,五峰组为灰黑、黑色泥岩,富含硅质、有机质和黄铁矿,为深水盆地相沉积。

(4)志留系:志留系进一步划分为高家边组、坟头组和茅山组。高家边组为浅灰—深灰色泥岩、粉砂质泥岩夹泥质砂岩,底部黑色泥岩发育,为浅海—半深海相沉积。而坟头组、茅山组为滨海相—泛滥平原相,细砂岩、粉砂质泥岩等。

(5)泥盆系:下扬子地区整体缺失中、下泥盆统,主要发育上泥盆统,称为五通组,为三角洲平原相岩性为灰色砂岩、灰黑色泥岩、粉砂质泥岩。

(6)石炭系:石炭系自下而上可划分为金陵组、高郢山组、和州组、黄龙组和船山组。金陵组主要发育深灰、灰黑色含生物屑灰岩,为开阔台地边缘相沉积。高郢山组主要发育灰色泥岩、灰黑色细砂岩,局部含煤,为泛滥平原沼泽相沉积。和州组发育灰黑色泥质灰岩,属于浅海陆棚相沉积,厚度小。黄龙组主要发育浅灰、棕灰色灰岩、生物碎屑灰岩,开阔台地相沉积。船山组发育灰色灰岩,为开阔台地相沉积。

(7)二叠系:二叠系在下扬子地区分布较广,从下而上可以划分为栖霞组、孤峰组、龙潭组和大隆组。栖霞组在皖南地区主要发育深灰、灰黑色泥晶灰岩及粉砂质泥岩、灰质泥岩,下部富含沥青,中、上部见硅质灰岩,属于开阔台地相沉积。孤峰组发育灰黑色泥岩,硅质、灰质泥岩夹白云质灰岩,为深水盆地相沉积。龙潭组主要发育灰黑色泥岩、炭质泥岩和灰色细砂岩、泥质粉砂岩互层,夹煤层,属于滨岸沼泽—三角洲相沉积。龙潭组泥岩、泥灰岩及煤层中均有裂缝、微裂缝分布,大隆组主要发育黑色泥岩,富

含硅质,属于盆地—深水陆棚相沉积。

2 暗色泥页岩的发育层位

下扬子地区古生界共有5套富有机质页岩,由底至顶分别是下寒武统的荷塘组(ϵ_1h)/幕府山组(ϵ_1m)、下奥陶统的宁国组(O_1n)、上奥陶—下志留统的五峰组(O_3w)和高家边组(S_1g)、中二叠统的孤峰组(P_2g)、上二叠统的龙潭组(P_3l)和大隆组(P_3d)。从富有机质页岩厚度和有机质丰度的横纵向分布来看,下寒武统荷塘组和上二叠统龙潭组是下扬子地区有机质页岩最发育的层位(图2、图3)。

根据浙、苏、皖三地有关的区域地质报告和野外调查,荷塘组露头主要分布于皖南安庆、屯溪、临安东一带,厚为27~733m,一般厚230~560m;幕府山组分布极零星,仅在南京幕府山附近,厚为117~148m。宁国组主要分布于皖南胡乐一带,厚97~109m。五峰组和高家边组主要分布于皖南安庆一带,五峰组极薄,厚0.8~21m;高家边组则很厚,可达千米。孤峰组主要分布于皖南宣城、铜陵一带,厚为10~231m。龙潭组主要分布于皖南宣城、广德和浙西长兴一带,厚为56~463m,整体呈东厚西薄之势。大隆组主要分布于皖南宣城、安庆一带,厚为11~79m。

为进一步了解下扬子地区几套富有机质页岩的横纵向展布,已对几个重要位置点进行了露头实测。各测点页岩所在层位的厚度和各层位页岩累计厚度统计结果见表1。

3 暗色泥页岩的地球化学特征

3.1 寒武系

下扬子地区寒武系暗色泥页岩主要发育在下寒武统,在浙西、皖南地区为荷塘组,在苏南、苏北地区为幕府山组。

皖南—浙西北地区下寒武统荷塘组泥质岩极其发育,不仅厚度大,而且有机质丰度高。总有机碳(TOC)含量最低为0.48%,最高为32.13%,平均值为3.09%。有机质类型为I型。下寒武统整体上热演化程度均较高,皖南石台—休宁—浙西一带 R_o 均大于2.1%,个别达到6.3%,属于高演化阶段。

苏南地区下寒武统幕府山组泥页岩也较发育,虽然有机质丰度不如皖南—浙西地区高,但也较高。TOC低于0.5%的样品仅占3%左右,80%的样品有机碳含量在2%以上,平均含量达到2.93%。

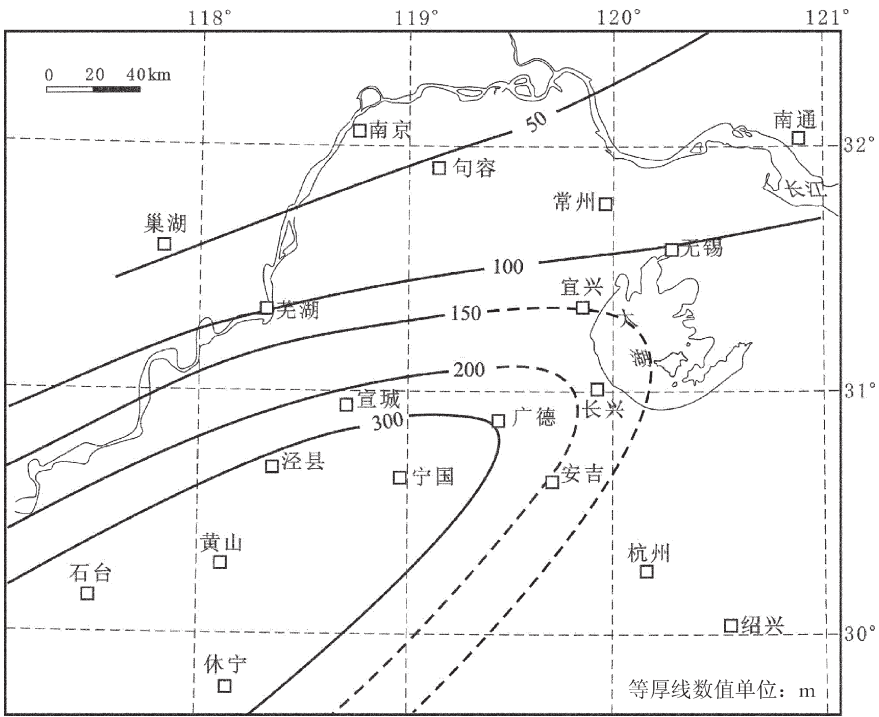


图2 下扬子地区长江以南下寒武统暗色泥页岩厚度分布

Fig. 2 Lower Cambrian dark shale thickness distribution of the lower Yangtze area

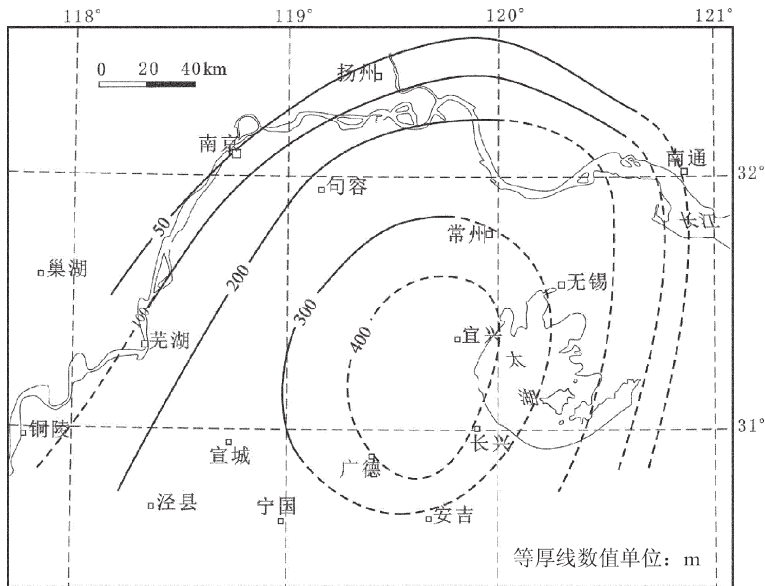


图3 下扬子地区长江以南上二叠统龙潭组暗色泥页岩厚度分布

Fig. 3 Dark shale thickness distribution in Longtan Formation of Upper Permian in the south of Yangtze River in the lower Yangtze area

有机质类型为 I~II 型。在金湖—巢北冲断体地区和沿(长)江冲断前缘带,有机质 $R_o > 2.5\%$,属高演化区。

3.2 上奥陶统五峰组—下志留统高家边组

上奥陶统五峰组—下志留统高家边组主要分布在苏南和苏北地区,岩性基本上以泥岩、含硅质泥

表 1 皖南地区富有机质泥页岩主要分布层位和厚度
Table 1 Horizons and thickness of organic-rich shale in southern Anhui

| 实测位置 | 层位 | 层位实测厚度 | 页岩累计厚度 |
|-------|--------------------------|----------------|---------------|
| 宁国万家 | 荷塘组 (ϵ_{1h}) | 453.7m | 405.6m |
| 石台红桃村 | 荷塘组 (ϵ_{1h}) | 330.8m | 220.5m |
| 黟县江溪村 | 荷塘组 (ϵ_{1h}) | 351.5m | 338.1m |
| 休宁小溪村 | 荷塘组 (ϵ_{1h}) | >230m (仅实测中下部) | >217m |
| 南京幕府山 | 幕府山组 (ϵ_{1m}) | >45m (仅实测下部) | >45m |
| 宁国胡乐 | 宁国组 (O_{1n}) | 110m | 110m |
| 泾县昌桥 | 孤峰组 (P_{2g}) | 13.1m | 13.1m |
| 繁昌荻港 | 孤峰组 (P_{2g}) | 138.2m | 81.9m |
| 巢湖平顶山 | 孤峰组 (P_{2g}) | 24.6m | 24.6m |
| 泾县昌桥 | 龙潭组 (P_{3l}) | 72.9m | 38.5m |
| 繁昌荻港 | 龙潭组 (P_{3l}) | 77m (露头仅见下部) | 5.5m (露头仅见下部) |
| 巢湖平顶山 | 龙潭组 (P_{3l}) | 35m | 0m |
| 泾县昌桥 | 大隆组 (P_{3d}) | 88.4m | 47.6m |
| 巢湖平顶山 | 大隆组 (P_{3d}) | 22m | 17.5m |

岩、粉砂质泥岩和粉砂岩为主,灰岩不发育。TOC 含量在 0.01%~3.53%之间,平均值较低,仅为 0.31%,其中 81%的样品 TOC 含量低于 0.5%。此外,这些泥页岩的原始热解生烃潜力也不高,平均原始热解生烃潜力为 3.92mg/g,属于中等生烃潜力的烃源岩。有机质类型为 II~III 型。

该套泥页岩热演化程度整体较高。在沿江冲断带和常州一带 $R_o > 2.5\%$ 。另外,在西部巢湖-枞阳冲断体和东南部太湖逆掩构造区的无锡-长兴一带,分别出现了 2 个 $R_o > 3.0\%$ 的北东向过成熟区。其余地区 R_o 实测值都大于 1.5%,属高一过成熟区。

3.3 二叠系

二叠系暗色泥页岩主要分布在中二叠统的孤峰组 and 上二叠统的龙潭组中。

孤峰组主要以泥岩、硅质岩为主,该套地层泥岩有机质丰度高,广泛分布于下扬子地区,但厚度相对较薄,一般在 20~60m 之间。句参 1 井、新苏泰 159 井、N4 井等 10 多口探井和剖面样品分析显示,孤峰组泥岩有机碳的含量很高,平均有机碳含量基本在 4%以上。有机质类型为 II~III 型。

龙潭组是一套含煤沉积地层,以泥岩、粉砂质泥岩沉积为主,夹炭质泥岩、少量煤层及灰岩,因此烃源岩的类型比较多,而且龙潭组在下扬子地区分布广泛,地层厚度在 200~463m 之间,变化比较大。有

机碳含量较高,TOC 平均值为 1.85%,主要集中在 0.5%~2.0%之间,占全部样品的 75%(图 4)。该组主要分布于泾县—宣城—宁国—广德—长兴一线以北,长兴地区为当时的沉积中心,沉积了一套以泥岩为主的煤系地层,TOC 含量较高。向西至荻港—巢湖一带相变为以砂岩、粉砂岩为主,仅局部夹含泥页岩及煤层,TOC 含量降低。

二叠系暗色泥页岩 R_o 在 1.5%~2.3%之间,属高成熟区;东南部无锡—宜兴太湖逆掩构造带 R_o 达 2.44%~3.05%,属过成熟区。

4 页岩气有利勘探区

下扬子残留盆地/地块的海相地层层序及其烃源岩残存状况差别较大,页岩气赋存能力亦不同。从页岩气形成的基本条件和控制因素出发,认为目前较有利于页岩气勘探的目的层位有 2 个,一个是皖南下寒武统荷塘组,另一个是上二叠统龙潭组。

皖南下寒武统荷塘组 TOC 含量较高,有机质类型好,具有页岩气形成的基本条件。印支运动以来,皖南受构造运动改造较强烈,石台—黄山—旌德以南,下寒武统抬升较高,地层剥蚀强度较大,页岩气保存条件受到破坏。但该线以北抬升幅度相对较小,保存条件相对较好,具备页岩气成藏的可能性。

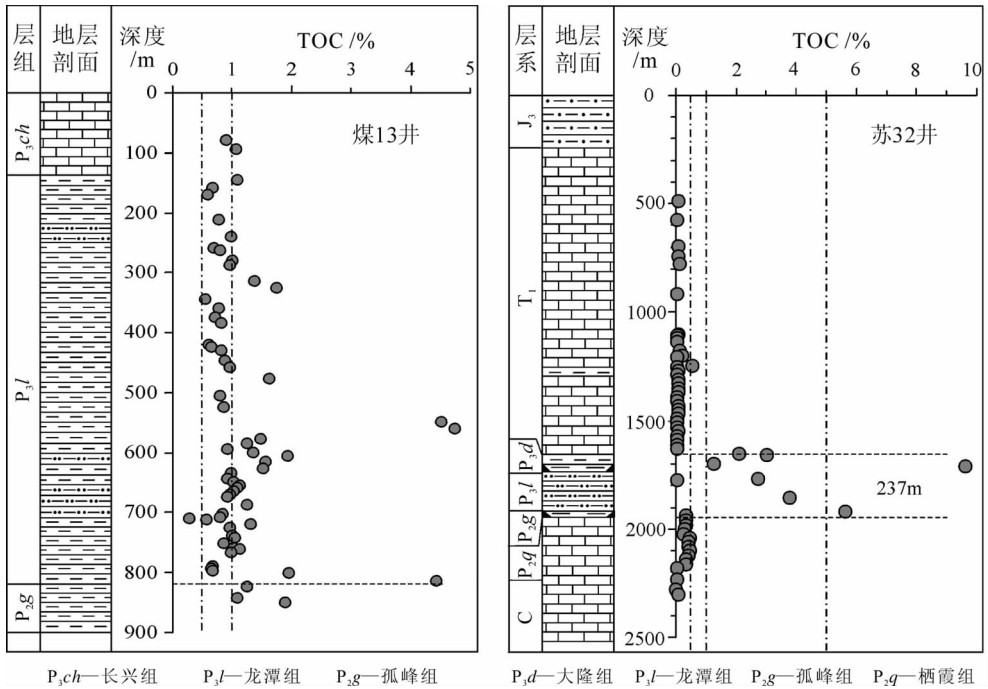


图4 下扬子地区二叠系烃源岩 TOC 含量与深度的关系^[4]

Fig. 4 Relationship between TOC content and thickness of Permian hydrocarbon source rocks of the lower Yangtze area

区域上,上二叠统龙潭组属于海—陆过渡相沉积,沉积了以泥、页岩为主,砂岩、粉砂岩次之的一套煤系地层。龙潭期沉积中心位于安徽广德—浙江长兴—江苏张渚一带,TOC 较高,平均值达 1.9%,主要以泥、页岩为主。从 20 世纪 70 年代浙江长兴煤山地区煤井钻探的情况来看,该区在 C 煤层之上和之下均沉积了较厚的泥页岩,特别是 C 煤层之下,泥岩单层厚度达 30m 左右,且与砂岩/粉砂岩互层,脆性矿物含量较丰富,TOC 含量高,热演化程度在 1.5%~2.0%之间,与美国工业开采的页岩气热演化程度大致相当,应是较有利的勘探地区。西部的荻港—巢湖一带水体较深,岩性主要为粉、细砂岩夹泥页岩及煤层,但由于泥页岩厚度较薄,页岩的生烃量受到限制,与东部的广德—长兴一带相比,资源潜力大大降低。

下扬子地区尽管暗色泥页岩分布较广,有机碳含量高,但不容忽视的一个问题是,与上扬子和周边地区相比,自印支期以来下扬子地区构造运动十分强烈,地层重复、倒转、褶皱现象十分普遍。因此,在勘探过程中,应该在构造改造强烈的背景下,寻找构

造活动相对较弱的区域进行勘探。

5 页岩气调查与勘探中存在的问题

下扬子地区泥页岩虽然分布较广、厚度较大,但以下问题的存在对页岩气的生成、富集和分布产生了重要的影响。

(1)地貌简单但风化严重。在地形、地貌上,下扬子地区多为平原或丘陵,对页岩气地质调查作和施工相对有利,但露头受到地表风化影响较大,获取页岩气的相关参数具有一定困难。

(2)构造极其复杂。下扬子地区具有独特的地质演化特点,特别是自印支运动以来,遭受了比上扬子更强烈的后期改造,对古生界海相地层产生了巨大影响,逆冲、倒转构造发育,地层关系极其复杂,页岩气地质调查和研究难度很大。二叠系龙潭煤层、志留系下部泥岩层等滑脱层的存在,使上、下古生界受后期构造影响的程度不同,上古生界变形强烈,下古生界相对稳定,圣科 1 井钻探资料进一步证实了这一认识。埋深过大、热演化程度过高在一定程度上影响了下古生界页岩气的富集。

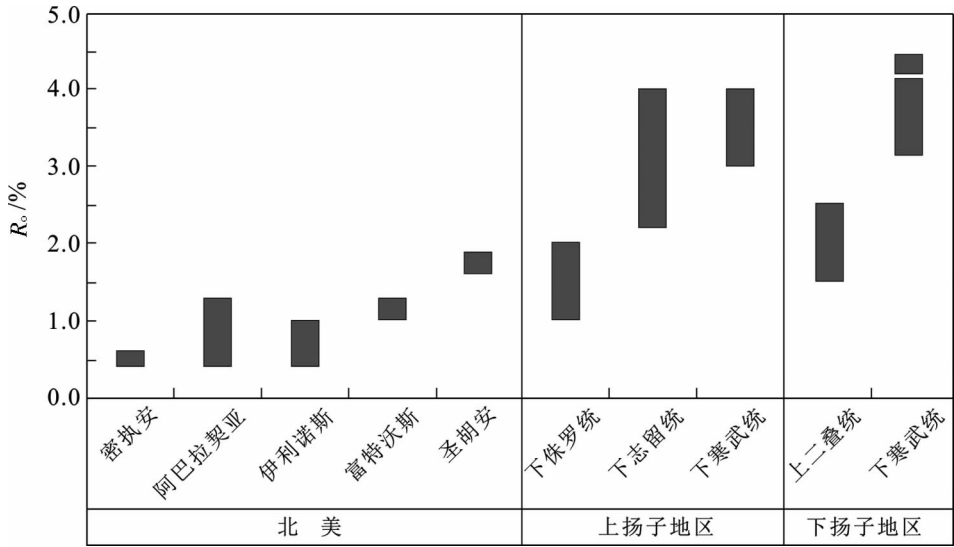


图 5 下扬子地区不同层系暗色页岩 R_o 与国内外页岩对比

Fig. 5 Comparison of dark shale R_o in different horizons of the lower Yangtze area with other domestic and foreign counterparts

(3) 下古生界热演化程度过高。下扬子地区海相泥页岩有机质热演化成熟度整体过高, R_o 普遍超过 1.5%。特别是下寒武统, 处于高一过成熟演化阶段, R_o 为 3.0%~4.0%, 最高可达 6%, 比北美目前进行工业开采的页岩地层的成熟度普遍偏高, 也稍高于上扬子的有机质的热演化程度(图 5), 给下扬子地区页岩气前景分析和勘探提出了新的问题和挑战。

(4) 火山活动频繁。燕山早、中期, 扬子板块与华北板块拼贴导致本区中、古生界发生强烈变形, 形成一系列紧闭、平卧褶皱和冲断推覆构造, 并引起大面积火山喷发及岩体侵入^[1]。大规模的中酸性火山岩流、火山碎屑的覆盖和堆积使泥页岩的组成、结构均发生了变化, 也制约了页岩气的富集。

参考文献

[1] 张金川, 聂海宽, 徐波, 等. 四川盆地页岩气成藏地质条件[J]. 天然气工业, 2008, 28(2): 151-156.
 [2] 程克明, 王世谦, 董大忠, 等. 上扬子区下寒武统筇竹寺组页岩气成藏条件[J]. 天然气工业, 2009, 29(5): 40-44.

[3] 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(一)——南方四套区域性海相烃源岩的分布[J]. 海相石油地质, 2008, 13(2): 1-16.
 [4] 马力, 陈焕疆, 甘克文, 等. 中国南方大地构造和海相油气[M]. 北京: 地质出版社, 2004: 259-275.
 [5] 陈沪生, 张永鸿. 下扬子及邻区岩石圈结构构造特征与油气资源评价[M]. 北京: 地质出版社, 1999.
 [6] 邓晋福, 叶德隆, 赵海玲, 等. 下扬子地区火山作用深部过程与盆地形成[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1992.
 [7] 陈沪生. 下扬子地区重建型海相烃源岩油气领域评价及勘探对策[J]. 海相石油地质, 2002, 7(2): 33-41.
 [8] 万天丰. 中国大地构造学纲要[M]. 北京: 地质出版社, 2004
 [9] 水涛. 中国东南大陆基底构造格局[J]. 中国科学(D 辑), 1987, 17(4): 414-422.
 [10] Xian-hua Li, Wu-xian Li, et al. Amalgamation between the Yangtze and Cathaysia Blocks in South China: Constraints from SHRIMP U-Pb zircon ages, geochemistry and Nd-Hf isotopes of the Shuangxiwu volcanic rocks[J]. Precambrian Research, 2009, 174: 117-128.
 [11] 陈安定, 刘东鹰, 刘子满. 江苏下扬子区海相中、古生界烃源岩晚期生烃的论证与定量研究[J]. 海相石油地质, 2001, 6(4): 27-34.