

皖南地区下寒武统页岩气成藏地质条件

卢炳雄,郑荣才,文华国,徐文礼

(成都理工大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室,四川 成都 610059)

摘要:以野外剖面观测和室内薄片及扫描电镜分析为基础,结合地质与钻井等资料,提出皖南地区下寒武统沉积相的具体划分方案。认为盆地相的深水还原环境是形成页岩气藏的最佳相带,而碳酸盐缓坡不利于页岩气勘探;对储层贡献最大的储集空间类型为裂缝,其次为次生溶蚀微孔,而晶间孔相对不发育,对储层的贡献则十分有限。从富含有机质页岩的空间展布、地化特征、保存条件等方面出发,采用页岩气目标优选评价综合分析方法,对皖南地区下寒武统页岩气成藏条件进行了研究,着重定量评价了页岩厚度、有机碳含量、镜质体反射率、脆性矿物含量等指标。皖南地区下寒武统页岩平均厚度大于50 m,石台县—南陵县一带达页岩厚度最大值为200~600 m;有机碳含量较高,平均值达2.37%;镜质体反射率平均值大于2%,页岩气藏处于干酪根裂解气的成熟—高熟阶段;脆性矿物含量较高,平均值为46.89%,有利于压裂形成网络裂缝。通过与美国主要页岩气藏的地化参数进行对比分析,认为皖南地区下寒武统页岩具备非常优越的页岩气成藏条件,可选为我国非常规能源首选的有利区之一。

关键词:沉积相;热演化;构造运动;页岩气;皖南地区

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Accumulation conditions of the Lower Cambrian shale gas in southern Anhui province

Lu Bingxiong, Zheng Rongcai, Wen Huaguo, Xuwenli

(State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: Based on outcrop investigation, thin-section observation and SEM analysis, a detail division scheme of sedimentary facies was proposed for the Lower Cambrian in southern Anhui combining with geology and wellbore data. The most favorable facies belt for shale gas accumulation is deep-water deduction environment in the basin, while the carbonate ramp is unfavorable for shale gas exploration. Fractures make the greatest contribution to the storage of shale gas reservoir, followed by the secondary dissolution micro-pores. In contrast, intercrystalline pores contribute the least due to their relatively poor development. This paper comprehensively studied the geological characteristics of the Lower Cambrian shale gas play in southern Anhui in such aspects as spatial distribution of organic-rich shale, geochemical behaviors and preservation conditions. The study was focused on quantitative evaluation of shale thickness, TOC content, R_o and brittleness. The Lower Cambrian shale in southern Anhui is more than 50 meters on average, with the maximum thickness in the range from 200 to 600 meters occurring in Shitai and Nanling counties. The shale gas play has an average TOC content of 2.37%. The average R_o is more than 2%, indicating that the shale is at mature-high mature stage. The average brittle mineral content is 46.89%, being favorable for the creation of fracture networks through hydraulic fracturing. Based on comparison with the geochemical parameters of the main large shale gas plays in America, it is indicated that the Lower Cambrian shale in southern Anhui has favorable accumulation conditions for shale gas, thus can be selected as one of the play fairways in China.

Key words: sedimentary facies, thermal evolution, tectonic movement, shale gas, southern Anhui, province

页岩气藏是由连续生物成因、热成因或生物—热成因形成的天然气藏,是一类近期受到国内外高度重视的非常规天然气藏^[1]。与常规天然气藏不同,在页岩气藏中页岩既是烃源岩又是储集层,页岩气的赋存方式和常规天然气也有所不同,页岩气主体表现为在天然裂缝和颗粒间孔隙中以游离方式存在,也可以在

干酪根和粘土颗粒表面上以吸附状态存在或溶解状态存在^[2],页岩气的富集成藏过程往往体现为没有或仅有极短距离的运移。由于页岩气藏中产气页岩分布范围广、厚度大且普遍含气但丰度低的特点,因而页岩气的开发具有产量低,寿命与生产周期长、稳定的优点。中国页岩气资源调查研究结果表明,我国富含有机质

收稿日期:2014-06-26;修订日期:2014-08-12。

第一作者简介:卢炳雄(1987—)男,博士研究生,矿物学、岩石学、矿床学。E-mail:10158258@qq.com。

通讯作者简介:郑荣才(1950—)男,教授,博士生导师,沉积学和石油地质学。E-mail:zhengrc@cdut.edu.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2008ZX05030-003-02)。

的暗色页岩分布十分广泛,南方、鄂尔多斯、吐哈、茂名、抚顺、准格尔等地区古生界的海相页岩和中生界的湖相页岩都富含有机质,均具备形成页岩气的基本条件。据李大荣和张金川等统计^[1-2],我国页岩气资源潜力巨大,开发一旦有所突破形成产能,必将对缓解我国不断上涨的能源需求压力有巨大贡献^[3]。

1 区域构造特征

研究区位于安徽省中部和南部,构造上隶属于下扬子准地台。下扬子准地台东邻环太平洋构造带,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,南和东南以江山—绍兴深断裂与华夏板块为界,面积约 $22.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。研究区横跨沿江拗陷和皖南—苏南拗陷,南临江南隆起带,江南深断裂呈 NEE—SWW 向横穿研究区(图 1),是我国南方下古生界海相地层发育最全,保存相对较完整的地区之一。

皖南地区经历了多期的构造运动,从太古宙至新生代的构造演化大致可划分 5 个阶段^[4-5]:①太古宙古陆块形成期,形成了酷似上地壳最底部的深变质岩基底;②元古宙扬子板块和南方古陆形成期,扬子板块就是在这一时期形成;③早古生代—中三叠世海相克拉通盆地沉积期,扬子板块在此时期较稳定,沉积厚度大,部分地区沉积厚度可达上千米;④中生代印支—燕山运动期,形成晚三叠世—侏罗纪的陆相碎屑岩红层沉积建造;⑤新生代喜马拉雅构造期:由于印度次大陆和亚欧大陆的碰撞加剧,西太平洋岛弧边缘海的浮现,

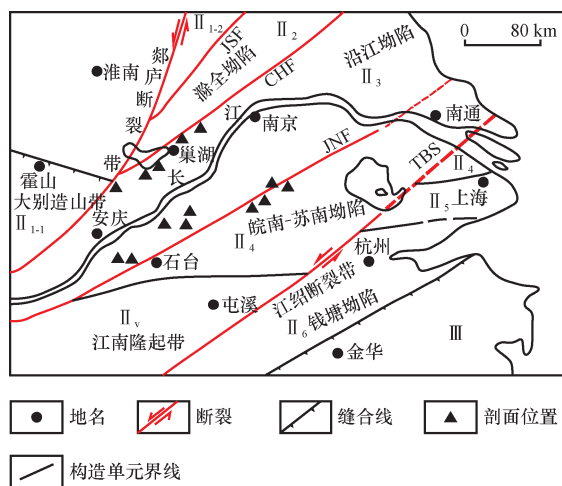


图 1 皖南地区构造单元划分及剖面位置

Fig. 1 Division of tectonic units and locations of outcrop sections in southern Anhui province

I. 华北板块; II. 扬子板块; II₁₋₁. 大别造山带; II₁₋₂. 胶南造山带; II₂. 滁全拗陷; II₃. 沿江拗陷; II₄. 皖南—苏南拗陷; II₅. 江南隆起带; II₆. 钱塘拗陷; III. 华南板块; JSF. 嘉山—响水断裂带; CHF. 滁河断裂; JNF. 江南断裂带; TBS. 天目山—白际山剪切带

挤压为辅、拉张为主的交替改造作用下,造成大型拗陷与断—拗复合型盆地叠加和形成现今构造的基本面貌。

2 油气地质特征

2.1 地层特征

下寒武统在江苏地区称之为幕府山组,在皖南地区称之为黄柏岭组及层位相当的黄栗树组,而在浙西地区称为荷塘组和大陈岭组^[6]。研究区下寒武统富有机质泥页岩在皖南地区广泛发育,层位、岩性和厚度都很稳定,以全椒县黄栗树剖面为例,自下而上被划分为 17 个小层(图 2),岩性主要为炭质页岩、硅质页岩及少量微晶灰岩,沉积相类型主要为具备深水还原环境性质的盆地相,对泥页岩发育及有机质保存都十分有利,因此,富有机质的黑色泥页岩在研究区下寒武统中发育十分广泛。

2.2 沉积相特征

皖南地区下寒武统生物化石含量非常低,仅在显微镜下可见到少量代表深水还原沉积环境的硅质放射虫和海绵骨针,二者同时出现可作为陆棚—盆地沉积环境的直接证据。通过野外剖面观测及薄片镜下观察,结合前人对该区域的沉积相研究,提出了皖南地区下寒武统沉积相划分方案,共划分为 2 个相、3 个亚相和 3 个微相类型(图 3),各沉积相类型的岩性组合和变化特征(表 1),所反映的沉积环境总体上具有水体从北向南逐渐加深和还原性增强的特点,以覆水最深的盆地相有机质保存最好和最稳定,因此,富有机质的暗色页岩在盆地相带最为发育,是页岩气勘探的重点相带,而碳酸盐缓坡对页岩气的勘探不利。

3 页岩气成藏地质条件

页岩气是主体以吸附和游离状态同时赋存于具有生烃能力的泥、页岩地层中的天然气,储层往往为有机质丰度高、成熟度适中的暗色泥页岩,具有集烃源岩、储集岩、盖层为一体,以及吸附成藏、隐蔽聚集等独立含油气系统的显著特点^[7-9]。因此,影响页岩气成藏

表 1 皖南地区下寒武统沉积相划分方案及其岩性特征

Table 1 Division scheme of the Lower Cambrian sedimentary facies and their lithology

沉积相	亚相	微相	岩性特征
碳酸盐 缓坡相	浅滩亚相	粒屑滩微相	含生屑微晶灰岩
	潮下亚相	静水泥微相	含硅质灰岩、微晶灰岩
盆地相	盆地亚相	盆地泥微相	黑色炭质页岩、含硅质页岩、硅质页岩

因素主要为页岩的自身特点,包括如下几个方面:
①页岩类型和沉积建造性质;②页岩的厚度和分布面积;③总有机碳含量和成熟度;④页岩的矿物成分、脆度及裂缝发育状况;⑤页岩储层微孔隙发育程度。根据页岩气成藏机理和成藏地质因素^[9-16],结合皖南地区下寒武统页岩地质特点,对其页岩气成

藏潜力进行简要评述。

3.1 页岩类型及页岩厚度

皖南地区下寒武统暗色页岩十分发育,以有机质含量丰富的炭质页岩最为发育,其次是硅质页岩和钙质页岩,粉砂质页岩最少,属盆地相沉积。对各剖面页

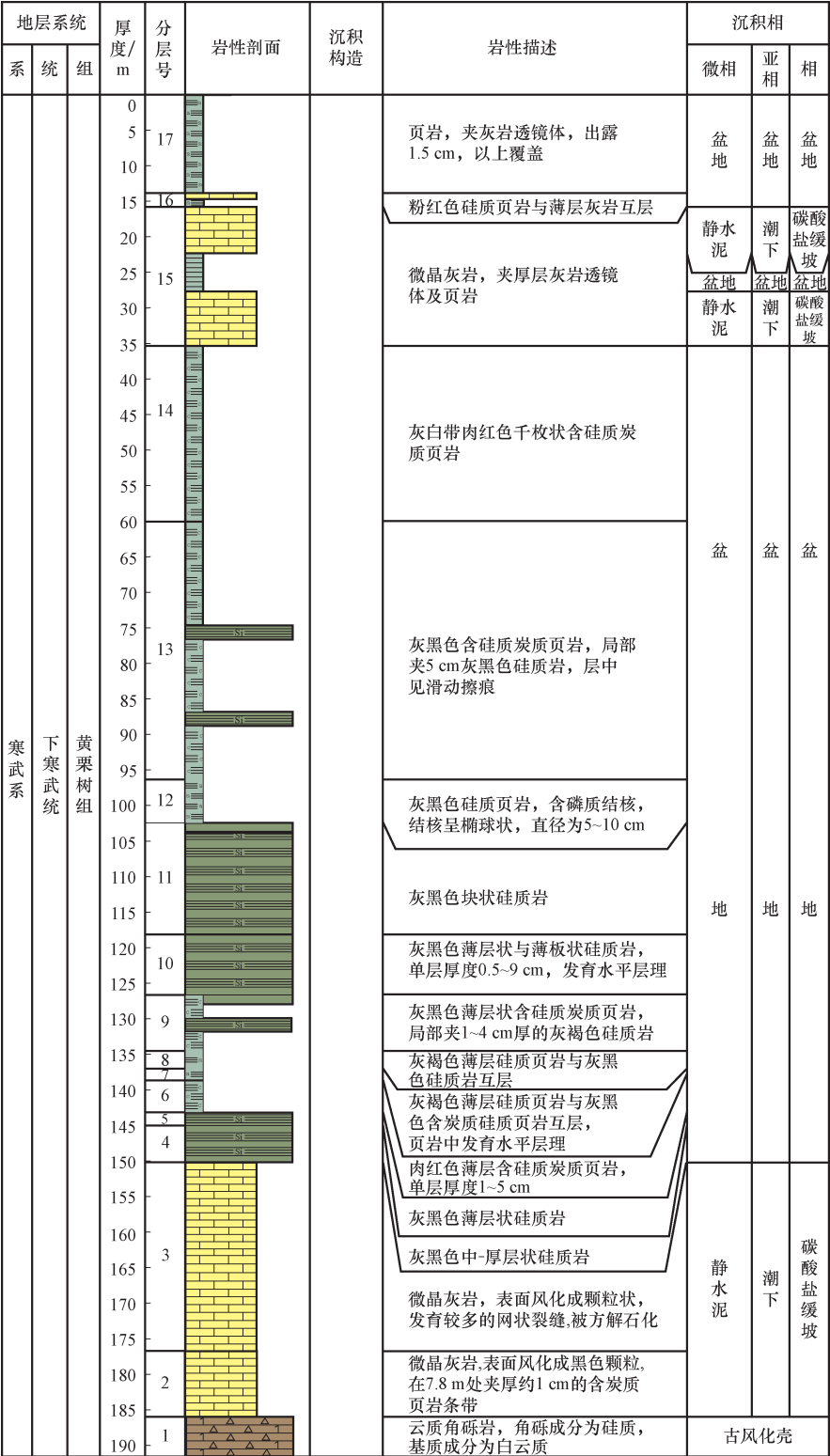


图 2 皖南地区全椒县黄栗树剖面地层综合柱状图

Fig. 2 Comprehensive column of the Huanglishu section in Quanjiao area, southern Anhui province



图3 皖南地区下寒武统沉积相

Fig. 3 Sedimentary facies of the Lower Cambrian in southern Anhui province

岩类型及厚度统计如下:青阳县丁门口剖面页岩累积厚度为497 m,黑色炭质页岩、钙质页岩和粉砂质页岩厚度分别为296,159和42 m;全椒县黄栗树剖面页岩累积厚度为103 m,黑色炭质页岩和硅质页岩厚度分别为83和20 m;石台县皂角树剖面页岩累积厚度为51.5 m,其中黑色炭质页岩和硅质页岩厚度分别为43.5和8 m;泾县西贡-唐村剖面页岩累积厚度为67 m,钙质页岩、灰绿色页岩和粉砂质页岩厚度分别为57,5和5 m;宁国市杨树岭剖面页岩累积厚度为430 m,黑色炭质页岩、灰绿色页岩、硅质页岩和粉砂质页岩厚度分别为95,55,255和25 m。从上述数据可看出,皖南地区下寒武统页岩厚度总体较大,富含有机质的炭质页岩也十分发育,平均累积厚度为93.8 m。综合钻井资料收集和野外剖面测量结果,编制皖南地区下寒武统页岩厚度分布图(图4),其特点有:①下寒武统页岩厚度均相对较大,均大于50 m;②最大厚度位于安徽省南部石台县-南陵县地区,为200~600 m;③在江苏省台州市-兴化市地区页岩的厚度也达到200 m,其他地区均在50~200 m。

3.2 储层空间类型

根据扫描电镜分析结果,皖南地区下寒武统页岩

的主要储集空间类型为裂缝(图5),以黑色炭质页岩和硅质页岩中更为常见,裂缝不仅为页岩气聚集成藏提供空间,更主要的是作为页岩气运移通道,更能有效提高页岩产量,其成因与页岩中的脆性矿物含量及后期构造运动改造有密切关系。皖南地区黑色炭质页岩除了广泛发育裂缝之外,蜂巢状次生溶蚀微孔隙也十分发育,孔隙的大小为5~65 μm ,对储层的贡献仅次于裂缝,这些溶蚀微孔主要分布在片状粘土矿物间,少量为片状粘土矿物中长石颗粒被溶蚀淋滤形成(图5e)。而晶间微孔隙发育不多,对储层的贡献也十分有限,分布于重结晶的伊利石之间(图5f)。

3.3 页岩脆性矿物含量

在页岩气的勘探开发实践中,裂缝的发育程度直接影响了页岩气藏的含气总量及页岩气的开采难度和成本。众所周知,脆性矿物含量的增加可以提高岩石本身的脆性,脆性高的页岩在外力的作用下,如储层的压裂改造等更加容易形成裂缝,这些裂缝的形成对于改善十分致密的泥页岩的储集性是十分重要的,同时也大大提高了页岩气的开采价值。利用X-衍射方法分析样品37块,结果表明皖南地区下寒武统页岩的主要矿物组成为石英(图5d)和粘土矿物,平均含量分别为

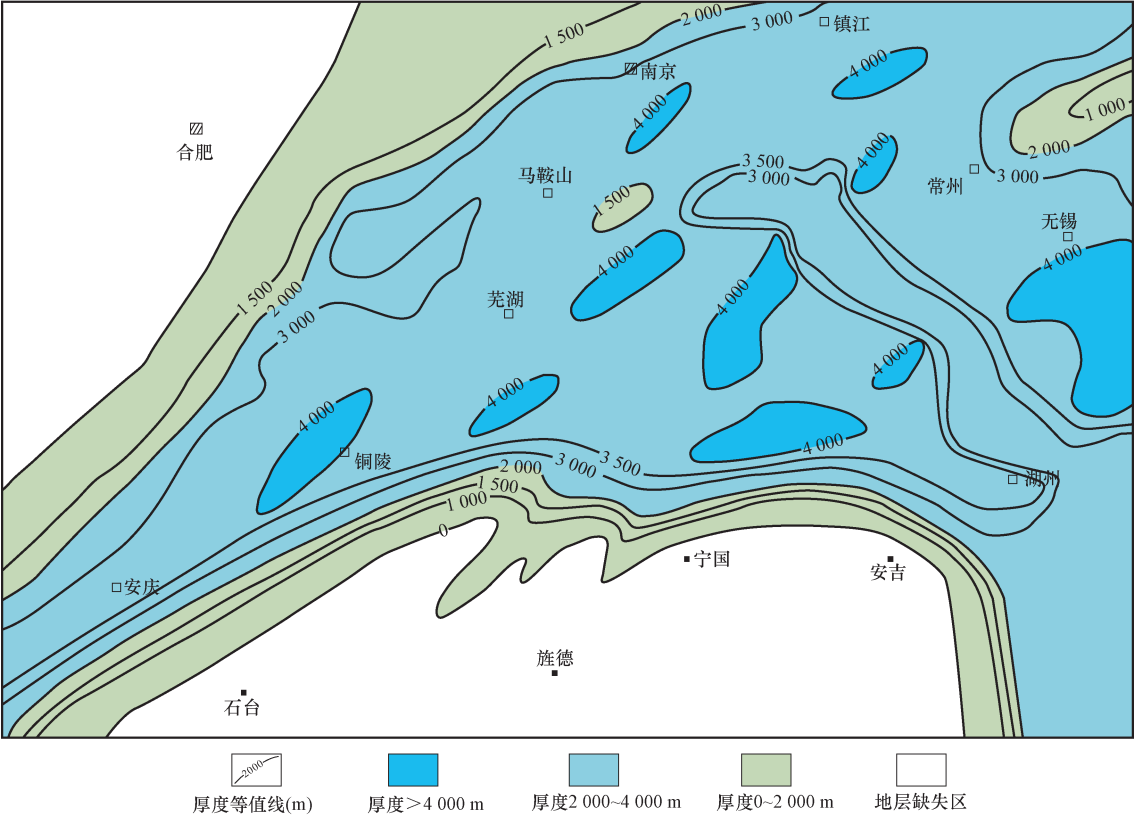


图 4 皖南地区下寒武统页岩等厚图

Fig. 4 Isopach map of the Lower Cambrian shale in southern Anhui province

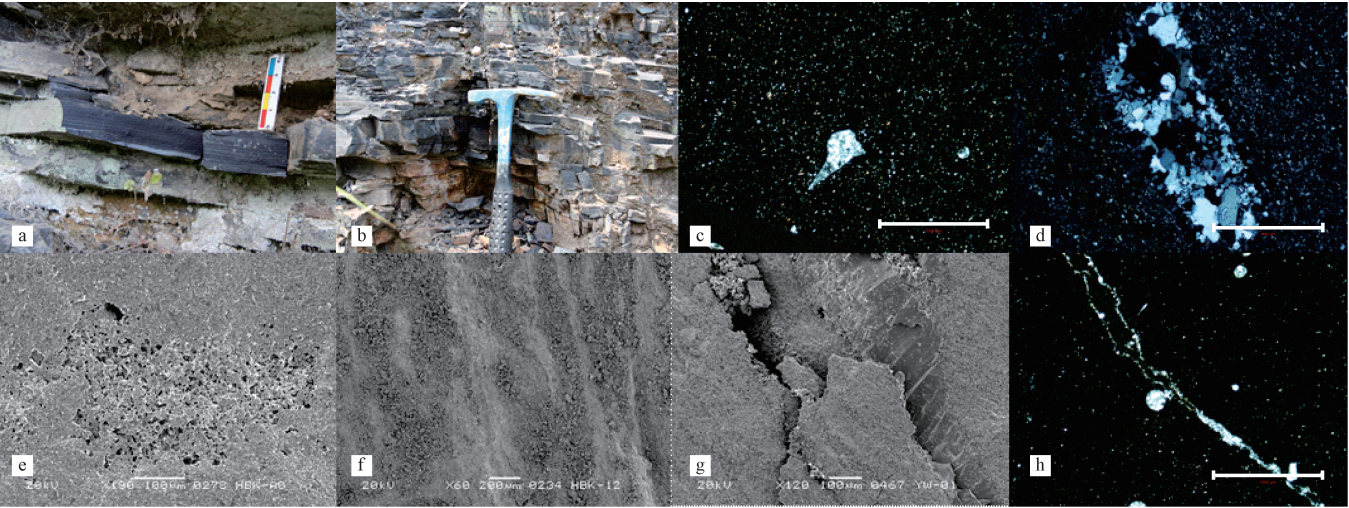


图 5 皖南地区下寒武统地表露头、薄片及扫描电镜照片

Fig. 5 Photographs of outcrops, thin-sections and SEM of the Lower Cambrian shale in southern Anhui province

- a. 黑色页岩, 青阳县丁门口剖面, 寒武系黄柏岭组, 盆地相; b. 黑色薄层硅质炭质页岩, 皂角树剖面, 下寒武统荷塘组, 盆地相; c. 炭质页岩, 硅质海绵骨针, 皂角树剖面, 下寒武统荷塘组, 盆地相; d. 炭质页岩, 页岩中的硅质脆性矿物, 皂角树剖面, 下寒武统荷塘组, 盆地相; e. 硅质页岩, 微晶石英之间的次生溶蚀微孔隙发育, 皂角树剖面, 下寒武统荷塘组, 盆地相; f. 炭质页岩, 伊利石集合体中发育少量的晶间微孔, 皂角树剖面, 下寒武统荷塘组, 盆地相; g. 黑色炭质页岩, 伊利石集合体中发育的晶间孔和裂缝, 皂角树剖面, 下寒武统荷塘组, 盆地相; h. 炭质页岩, 可见硅质放射虫, 裂缝发育, 充填有硅质, 皂角树剖面, 下寒武统荷塘组, 盆地相

和 35.65%, 碳酸盐矿物和长石少量, 平均含量分别为 6.14% 和 5.13%。在已有数据的基础上编制皖南地区下寒武统页岩脆性矿物平面分布图(图 6), 可以看出, 在无为-马鞍山-宣城-池州一带广阔的中心部位脆性矿物平均含量较低, 为 30% 左右, 而在外围的全椒-

广德-石台一带脆性矿物含量较高, 为 30%~90%, 研究区北部, 脆性矿物含量较高。

3.4 有机质丰度和成熟度

有机质丰度是指单位质量岩石中有机质的数量。

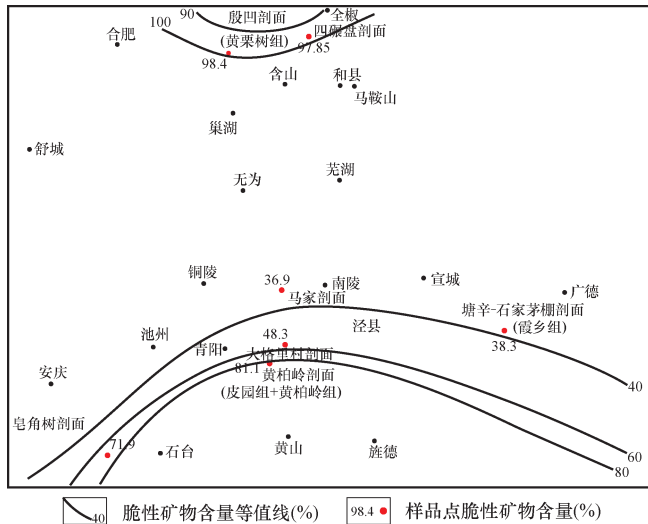
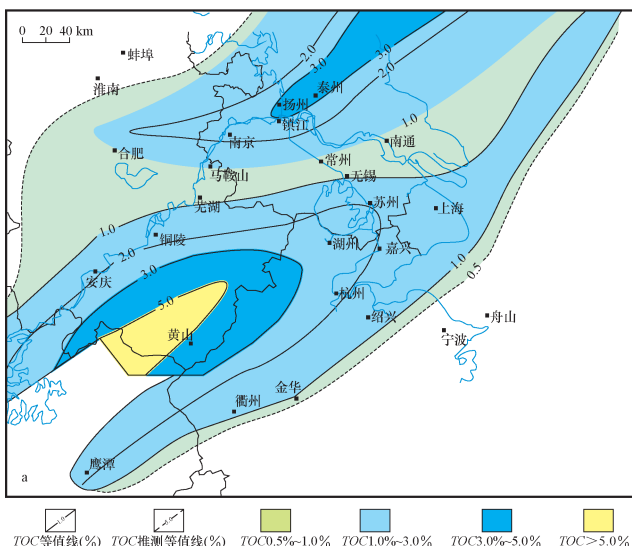


图6 皖南地区下寒武统页岩脆性矿物含量等值线

Fig. 6 Contour map of brittle mineral content in the Lower Cambrian shale in southern Anhui province

有机质丰度大小是衡量烃源岩生烃能力最基本的依据,在其它条件相近的前提下,岩石有机质丰度越高,其生烃能力越强。通过黄柏坑、幕府山、杨树岭、丁门口等下寒武统出露剖面页岩样品的观察-采集-测试-分析,结果显示下寒武统页岩总有机碳含量(TOC)为0.04%~8.2%(图7a),平均值为2.37%;氯仿沥青“A”含量为0.01%~0.28%,平均值为0.09%;生烃潜量为0~0.51 mg/g,平均值为0.12 mg/g。其中,黄柏坑剖面 TOC 平均值为3.9%,幕府山剖面 TOC 平均值为2.75%,杨树岭剖面 TOC 平均值为0.12%,丁门口剖面 TOC 平均值为0.97%。平面上存在两个 TOC 高值区,分别在泾县—宁国—叶坑坞附近和镇江—东台一带, TOC 值均大于3.0%,海安—南京—扬州和南陵—宣城—苏州一带 TOC 值约为2.0%左右,研究区下寒武统页岩有机质 TOC 主要为0.5%~2.0%。

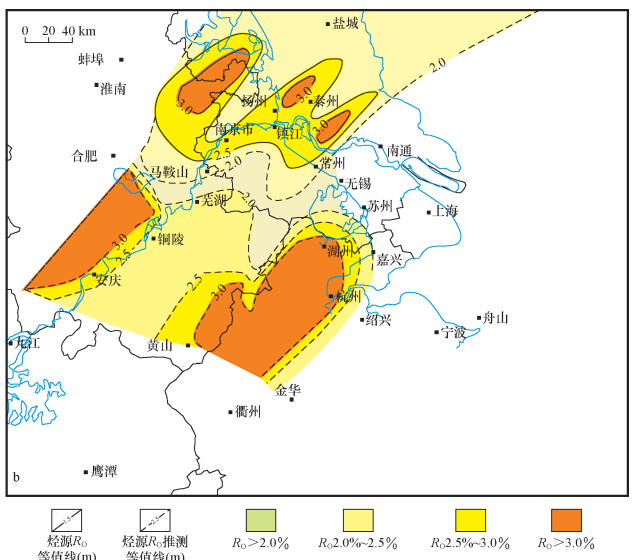


从总体上看,皖南地区下寒武统暗色页岩的有机碳含量较高,具备形成页岩气藏的优越烃源条件。

在已发现大型页岩气藏中,暗色泥页岩的有机质成熟度一般处于成熟-高熟阶段,因为只有在这个阶段,烃源岩的生烃能力才达到顶峰。34块样品分析结果,有59%的样品热解峰温 T_{max} 小于435℃,15%的样品 T_{max} 介于450~580℃,25%的样品 T_{max} 大于580℃。表明皖南地区下寒武统暗色页岩的热演化程度大部分适中,部分略为偏高(图7b),与34块样品的镜质体反射率(R_o)值全部大于2%,最高超过5%,基本属于高成熟-过成熟阶段,达到生烃高峰期,不仅证明了皖南地区下寒武统页岩具备良好的生烃条件,同时也证明了页岩气成因类型主要为热解气和裂解气。

3.5 页岩气保存条件

皖南地区下寒武统页岩气保存条件,主要受印支期的挤压以及燕山期和喜马拉雅期的伸展两期构造的影响。印支期的挤压构造以逆冲推覆形式由江南造山带、大别-苏鲁造山带向皖南地区传播。因此,研究区北部和南部下寒武统因较大面积的长时间出露,遭受风化而失去页岩气保存条件;而研究区处于两者中心,由于应力场的随着传播逐渐减弱,加上埋深较深,从研究区中部野外露头的观测结果看,主要表现为弱的褶皱构造(图8),对研究区下寒武统页岩气藏的破坏性不大,有利于页岩气藏的形成和保存。燕山期-喜马拉雅期的构造活动表现为由研究区的中部向西南、东北两侧拉伸,而向西南侧拉伸的作用力明显大于东北一侧,在铜陵和繁昌地区的剖面中发现小规模张性断层证实了这点,而张性断层的发育对页岩气的保存显然是不利的。因此,研究区的东北部更有利于页岩气成藏。

图7 皖南地区下寒武统页岩有机质丰度a)及有机质成熟度 R_o b)等值线Fig. 7 Contour map of organic abundance (a) and R_o (b) of the Lower Cambrian shale in southern Anhui province

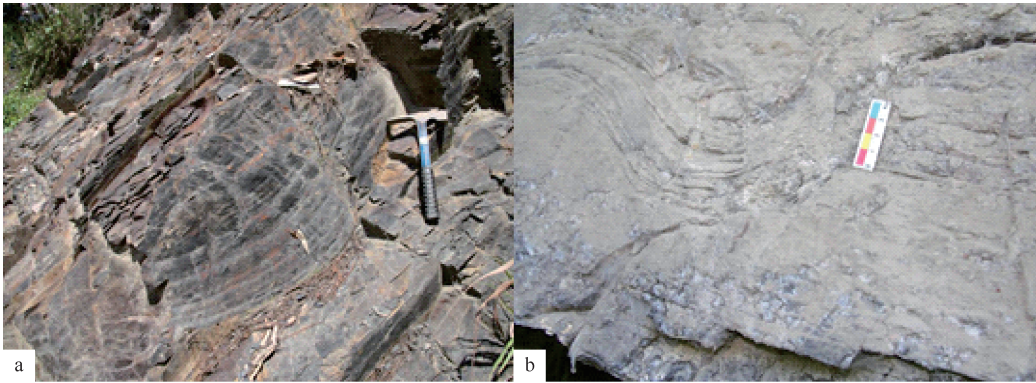


图 8 青阳县黄柏岭组剖面中的层内褶皱构造
Fig. 8 Intra-layer fold structures on the Huangbailing section in Qingyang County

表 2 皖南地区二叠系页岩与美国主要页岩气藏评价参数

Table 2 Evaluation parameters of the Permian shale in southern Anhui province and main shale gas plays of America

页岩名称	Barnett 页岩	Ohio 页岩	龙马溪组页岩	大安寨页岩	下扬子页岩
所在盆地	福特沃斯	阿巴拉契亚	四川盆地	四川盆地	皖南地区
盆地类型	前陆盆地	山前拗陷	前陆盆地	前陆盆地	下扬子陆缘裂陷盆地
层位	石炭系	泥盆系	志留系	侏罗系	下寒武统
岩性组合	含硅炭质页岩、灰岩和少量白云岩	炭质页岩和粉-细粒岩互层	炭质页岩、粉砂质泥页岩夹泥灰岩	炭质页岩夹泥质介壳灰岩	炭质页岩、硅质页岩和钙质页岩
有机碳含量/%	1.8~4.5	0~4.7	0.2~6.7	0.01~2.16	0.04~8.25
镜质体反射率 R_o /%	1.0~1.3	0.3~1.3	2.4~3.6	1.10~1.46	2.34~5.67
页岩厚度/m	15~61	9~30	20~120	2~16.9	93.8
埋藏深度/m	1 981~2 591	610~1 524	2 000~4 000	2 180~2 720	4 500~6 000
脆性矿物含量/%	35~50	45~60	51.5	60.4	46.89
成因类型	热解气	热解气	热解气	热解气	热解气、裂解气
干酪根类型	Ⅱ型	Ⅰ型、Ⅱ _A 型	Ⅰ型、Ⅱ _A 型	Ⅰ型、Ⅱ _A 型、	Ⅰ _B 型、Ⅱ _A 型

注：脆性矿物包括石英、斜长石、方解石、白云石和少量菱铁矿、黄铁矿等非粘土矿物组分。

3.6 页岩气成藏条件对比

鉴于目前国内还没有形成页岩气藏的评价标准,本文以美国 Barnett 页岩和 Ohio 页岩气藏勘探经验为指导^[1-3,10],结合皖南地区下寒武统页岩有机碳含量较高、类型较好,演化程度适中、单层厚度较大、分布范围广、脆性矿物含量高和具有较好-好的烃源岩性质等特征,与中国南方近期在页岩气勘探中取得重要进展的志留系龙马溪组页岩^[17-19]和下侏罗统自流井组大安寨段页岩各项参数进行对比(表 2),并同时考虑皖南地区下寒武统页岩分布面积较大,地质历史中始终深埋地腹而未被剥蚀,地表条件以地形高差较小的平原和丘陵为主,大、小江河密集分布,水资源丰富及交通便利等相关的辅要条件,认为皖南地区下寒武统页岩具备非常优越的页岩气成藏条件。

4 结论

1) 提出了皖南地区下寒武统沉积相具体划分方

案,共划分为 2 个相、3 个亚相和 3 个微相类型,并结合分析认为盆地相为页岩气勘探有利相带,而碳酸盐缓坡对页岩气的勘探是不利的。

2) 在综合评价皖南地区暗色页岩的厚度、有机质丰度、有机质成熟度和脆性矿物含量等各项指标的基础上,编制出各指标含量的平面等值线图,为皖南地区下寒武统页岩气的勘探与开发提供有效参考依据。

3) 基于皖南地区页岩具备形成页岩气藏的地质条件优越、保存条件和地表地形条件较好,且与国内外成功开发的页岩气藏的各项指标有一定的相似性,皖南地区页岩应该成为我国近期非常规能源规划的首选目标之一。

参 考 文 献

[1] 李大荣. 美国页岩气资源及勘探历史[J]. 石油知识, 2004, 104(3): 61.
Li Darong. American shale gas resources and their exploration history [J]. The Knowledge of Oil, 2004, 104(3): 61.
[2] 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.

- Zhang Jinchuan, Nie Haikuan, Xu Bo, et al. Geological condition of shale gas accumulation in Sichuan basin [J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(2): 151–156.
- [3] 徐国盛, 徐志星, 段亮等. 页岩气研究现状及发展趋势, 成都理工大学学报, 2011, 12: 603–610.
- Xu Guosheng, Xu Zhixing, Duan Liang, et al. Status and development tendency of shale gas research [J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2011, 12: 603–610.
- [4] 赵宗举, 俞广, 朱琰, 等. 中国南方大地构造演化及其对油气的控制 [J]. 成都理工大学学报, 2003, 30(2): 155–168.
- Zhao Zongju, Yu Guang, Zhu Yan, et al. Tectonic evolution and its control over hydrocarbon in southern China [J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2003, 30(2): 155–168.
- [5] 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(3): 337–343.
- Pan Jiping, Qiao Wudu, 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(3): 337–343.
- [6] 卢炳雄. 中国南方下扬子地区下寒武统页岩气资源分布研究 [D]. 四川成都: 成都理工大学, 2012.
- Lu Bingxiong. Resource evaluation of shale gas in lower Cambrian of Lower Yangtze area, Southern China [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012.
- [7] 杨方之, 闫吉柱, 苏树桢, 等. 下扬子地区海相盆地演化及油气勘探选区评价 [J]. 江苏地质, 2001, 25(3): 134–141.
- Yang Fangzhi, Yan Jizhu, Su Shuan, et al. Evolution of marine basins and exploration direction estimation of oil and gas in lower Yangtze areas [J]. Jiangsu Geology, 2001, 25(3): 134–141.
- [8] Nelson R A. Geologic analysis of naturally fractured reservoirs: Contributions in petroleum geology and engineering [M]. Houston: Gulf Publishing Company, 1985: 320.
- [9] 李新景, 吕宗刚, 董大忠, 等. 北美页岩气资源形成的地质条件 [J]. 天然气工业, 2009, 29(12): 27–32.
- Li Xinjing, Lv Zonggang, Dong Dazong, et al. Geologic controls on accumulation of shale gas in North America [J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(12): 27–32.
- [10] 张抗, 谭云东. 世界页岩气资源潜力和开采现状及中国页岩气发展前景 [J]. 当代石油石化, 2009, 17(3): 10–18.
- Zhang Kang, Tan Yudong. The status of world shale gas resources potential and production status as well as development prospect of China's shale gas [J]. Petroleum & Petrochemical Today, 2009, 17(3): 10–18.
- [11] 邹才能, 董大忠, 王社教, 等. 中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力 [J]. 石油勘探与开发, 2010, 12(13): 641–653.
- Zhou Caineng, Dong Dazhong, Wang Shejiao, et al. Geological characteristics, formation mechanism and resource potential of shale gas in China [J]. Petroleum Exploration & Development, 2010, 12(13): 641–653.
- [12] 聂海宽, 唐玄, 边瑞康. 页岩气成藏控制因素及中国南方页岩气发育有利区预测 [J]. 石油学报, 2009, 30(4): 484–491.
- Nie Haikuan, Tang Xuan, Bian Ruikang. Controlling factors for shale gas accumulation and prediction of potential development area in shale gas reservoir of South China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(4): 484–491.
- [13] 朱炎铭, 陈尚斌, 方俊华等. 四川地区志留系页岩气成藏的地质背景 [J]. 煤炭学报, 2010, 35(7): 1160–1164.
- Zhu Yanming, Chen Shangbin, Fang Junhua, et al. The geologic background of the Silurian shale-gas reservoiring in Sichuan, China [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(7): 1160–1164.
- [14] 刘树根, 曾祥亮, 黄文明等. 四川盆地页岩气藏和连续型-非连续型气藏基本特征 [J]. 成都理工大学学报, 2009, 12: 578–592.
- Liu Shugen, Zeng Xiangliang, Huang Wenming, et al. Basic characteristics of shale and continuous-discontinuous transition gas reservoirs in Sichuan Basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2009, 12: 578–592.
- [15] 黄胜, 王国芝, 邹波等. 中上扬子区志留系龙马溪组页岩气勘探区优选 [J]. 成都理工大学学报, 2012, 04: 190–197.
- Huang Sheng, Wang Guozhi, Zhou Bo, et al. Preferred targets of the shale gas from Silurian Longmaxi Formation in middle-upper Yangtze of China [J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2012, 04: 190–197.
- [16] 刘伟, 余谦, 闫剑飞, 等. 上扬子地区志留系龙马溪组富有机质泥岩储层特征 [J]. 石油与天然气地质, 2012, (03): 346–352.
- Liu Wei, Yu Qian, Yan Jianfei. Characteristics of organic-rich mudstone reservoirs in the Silurian Longmaxi Formation in Upper Yangtze region [J]. Oil & Gas Geology, 2012, (03): 346–352.
- [17] 聂永生, 冷济高, 韩建辉, 等. 黔东南地区岑巩页岩气区块勘探潜力 [J]. 石油与天然气地质, 2013, (02): 274–280.
- Nie Yongsheng, Leng Jigao, Han Jianhui, et al. Exploration potential of shale gas in Cen'gong block, southeastern Guizhou province [J]. Oil & Gas Geology, 2013, (02): 274–280.
- [18] 周德华, 焦方正, 郭旭升, 等. 郭旭升川东南涪陵地区下侏罗统页岩油气地质特征 [J]. 石油与天然气地质, 2013, (04): 450–454.
- Zhoudehua, Jiao Fangzheng, Guo Xusheng, et al. Geological features of the Lower Jurassic shale gas play in Fuling area, the southeastern Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2013, (04): 450–454.
- [19] 杨振恒, 韩志艳, 李志明, 等. 北美典型克拉通盆地页岩气成藏特征、模式及启示 [J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(04): 463–470.
- Yang Zhenheng, Han Zhiyan, Li Zhiming, et al. Characteristics and patterns of shale gas accumulation in typical North American cratonic basins and their enlightenments [J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(04): 463–470.

(编辑 董立)