

下扬子陆域下寒武统烃源岩特征 及其对南黄海油气勘探的借鉴

程青松^{1,2}, 龚建明^{2,3*}, 李智高⁴, 陈建文^{2,3}, 张 敏¹, 陈志强², 田瑞聪²

(1 长江大学地球环境与水资源学院, 武汉 430100; 2 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071;

3 海洋国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266071; 4 中海油深圳分公司研究院, 广州 510240)

摘 要:早寒武世下扬子陆块与华夏陆块均向北漂移并拼合成南方古陆, 发生褶皱隆升, 但对下扬子陆块北部(现今下扬子地区)影响不大, 总体处于浅海台地相。因为早寒武世早期受上升流等因素的影响, 下扬子地区早寒武世有机质来源丰富, 在缺氧还原的沉积环境形成了优质烃源岩。下扬子地区下寒武统烃源岩呈 NE 向展布, 受“一台两盆”构造格局影响存在 2 个沉积中心: 一个在安吉—休宁深水陆棚区, 厚度 100~300 m; 另一个在泰州—盐城深水陆棚区, 厚度 50~150 m。海侵主要来自东北方向, 烃源岩向东北方向减薄。从陆域烃源岩厚度分布趋势看, 南黄海盆地烃源岩厚度应在 50~200 m 之间。中生代南方古陆与华北陆块拼合形成中国大陆时, 对下扬子古生代形成的油气藏产生了严重的破坏。台缘相烃源岩厚度大、埋深大、生烃早, 生成的油气藏在中生代南北陆拼贴期遭到破坏, 是现今古油藏的烃源供给者。我们推测南黄海下寒武统为台地相沉积, 埋藏相对较浅, 热演化程度相对较低, 大部分烃源岩可能在燕山中—晚期发生过二次生烃, 有利于常规油气藏的保存。

关键词:烃源岩; 早寒武世; 南黄海; 下扬子陆域

中图分类号: P618.13

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2016.01011

寒武纪在扬子地台、塔里木地台和华北地台 3 大主要海相沉积区都发育了较好的页岩地层, 如南方扬子地区的筇竹寺组(ϵ_1q)页岩或沧浪铺组、牛蹄塘组、水井沱组、巴山组、荷塘组、幕府山组页岩。扬子地区的早寒武世页岩厚度大, 分布

范围遍及整个扬子地台区, 是麻江、凯里等古油藏及威远气田的主要烃源岩。林小云等^[1]通过野外样品地球化学分析测试并结合构造、沉积演化, 分析了中下扬子区中—古生界海相烃源岩的发育与分布, 认为下寒武统烃源岩在下扬子区分布于中央台地相两侧的缓坡; 下古生界有机质以腐泥型为主, 热演化程度较高。区域地质研究表明, 南黄海海域不仅是下扬子向海的延伸, 而且是下扬子的主体^[2]。南黄海海域广泛分布了海相中—古生界且青岛坳陷与陆上的苏北盆地相接^[3], 海陆地层具有可对比性。因此, 本文希望通过对下扬子陆域下寒武统烃源岩的特征及主控因素的研究, 为南黄海下寒武统油气勘探工作提供借鉴。

收稿日期: 2015-11-25

基金项目:国家自然科学基金(41406080); 国土资源部“南黄海前第三系油气前景研究”(XQ-2005-01); 中国地质调查局项目(GZH200800503); 国土资源部海洋油气资源和环境地质重点实验室基金(MRE201311)

作者简介:程青松(1990—), 男, 在读硕士, 主要从事油气地球化学研究工作. E-mail: 1092980292@qq.com

*** 通讯作者:**龚建明(1964—), 男, 博士, 研究员, 从事油气地质与天然气水合物研究工作. E-mail: gongjianm@aliyun.com

1 区域地质背景

扬子地区包括从云南中部到江苏的几乎整个长江流域和南黄海,是一个新元古代末形成的克拉通地区。进入寒武纪,扬子地区基本上以台地为主体,北有大别山外陆架盆地,东南边缘有一斜坡过渡带与江南外陆架盆地过渡连接,西部有康滇古陆,东北部有一小的大别陆块或古陆。江南或华南沉积区以外陆架盆地为主,江南沉积区向扬子和华夏沉积区均有一过渡类型的斜坡。外陆架盆地大致介于江南断裂和绍兴—江山、上饶—宜春、茶陵—郴州断裂之间,为呈 NE 向分布的梭形盆地^[4]。

南黄海地区西与苏北地区相连,北部以苏鲁造山带为界与中朝块体相邻,南部以江绍—沃川结合带为界,且与华南块体相邻,现今的南黄海盆地整体上为建立在中、古生代海相地层之上,经中、新生代构造运动强烈改造的叠合盆地,根据白垩纪以来的盆地展布特征,自北而南可划分出 3 个二级构造单元,分别是烟台拗陷、崂山隆起和青岛拗陷^[5](图 1)。

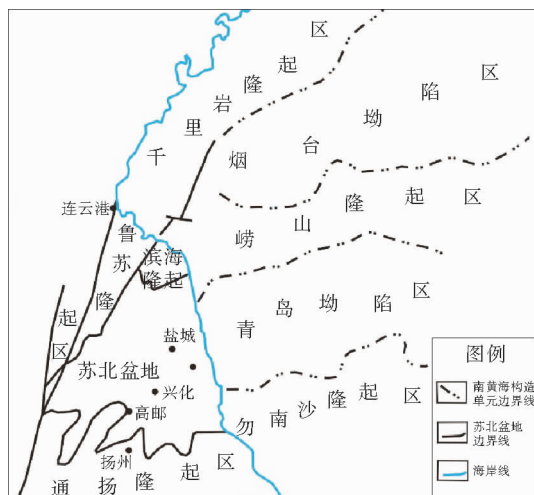


图 1 区域构造简图(据文献[6])

Fig. 1 The tectonic map of the study area
(from reference [6])

下扬子及邻区的岩石圈演化经历了 5 个阶段:太古宙古陆核形成期;元古宙下扬子板块形成期;古生代南方古陆形成期;中生代南、北陆块拼

贴期;中一晚燕山运动以来的大陆边缘离裂期。其中古生代南方古陆形成期是下扬子地区海相油气领域的形成期;中生代南、北陆拼贴期为油气藏破坏期;上述原生海相油气领域遭受重创,但主要是对当时已形成的油气系统的破坏,对烃源岩的破坏不是太严重,其中大部分的生烃潜力被保留。其主要原因是:热演化程度不高;地层抬升;烃源岩停止生烃或只进行微生物生烃;大量的生烃物质没有转化为液态烃散失^[7]。在中一晚燕山运动以来,大陆边缘离裂期是海相油气藏的重建期,该时期下扬子由原来的挤压型转变为拉张型动力场,形成一系列裂陷盆地,沉积陆相中—新生代地层,海相烃源岩二次埋深,发生二次生烃。朱家墩油气田的发现证实了海相烃源岩存在晚期成藏^[8]。

2 下扬子陆域区域地层

下扬子地区可划分为安徽、南京及南黄海地区 3 大区。安徽地区又分为扬子分区和江南分区。目前,南黄海盆地共有 7 口井钻遇了中、古生代海相地层,其中,中方 6 口,为 CZ12-1-1(最深钻遇石炭系)、WX13-3-1(钻遇下二叠统栖霞组)、CZ35-2-1(钻遇上二叠统龙潭组)、WX5-ST1(钻遇上二叠统龙潭组)、WX4-2-1(钻遇下三叠统青龙组)和 CZ24-1-1(钻遇下三叠统青龙组);韩方 1 口,为 KACHI-1 井(钻遇三叠系)。钻井资料证实,南黄海盆地广泛分布下扬子海相碳酸盐岩地层,岩性与陆上一致,为下扬子地区在海域的延伸。由于海域并没有钻遇寒武系,因此,通过资料收集和上下扬子野外实地考察获取的资料对比扬子板块陆域部分寒武系来预测海域寒武系(表 1)。

寒武纪地壳运动较频繁,在同一区域的不同时期或不同地区,陆源碎屑供应多少不一,海水深浅不同,所以其沉积特征亦不尽相同。总体上,下扬子区在早寒武世的沉积环境为滨浅海沉积。烃源岩厚度大部分在 50~200 m 之间(图 2)。

表 1 上下扬子区寒武系地层对比

Table 1 Cambrian stratigraphic correlation between Upper and Lower Yangtze areas

地质时代			上 扬 子 地 区		下 扬 子 地 区					
界	系	统			安 徽 地 区					南 京 地 区
					扬 子 分 区			江 南 分 区		
下 古 生 界	寒 武 系	上 统		车水桶组	山	唐村组	酉阳山组	观 音 台 群		
				琅琊山组	凹	青坑组				
				龙幡组	丁	团山组	华严寺组			
		中 统	陡坡寺组		杨柳岗组	群	杨柳岗组		杨柳岗组	
		下 统	孔明洞组/龙王庙组	黄栗树组	半汤组		黄柏岭组		大陈岭组	擂鼓台组
			仙女洞组/沧浪铺组		冷泉王组				荷塘组	炮台山组
筇竹寺组/牛蹄塘组							荷塘组			

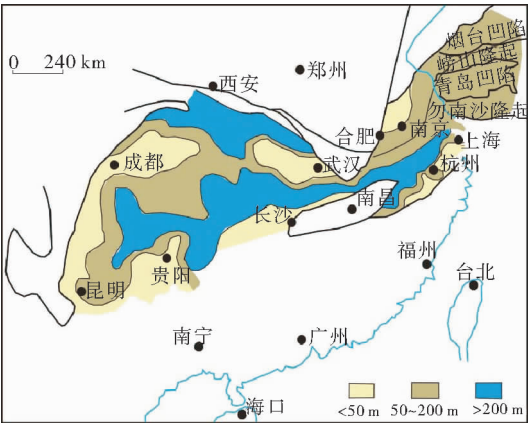


图 2 扬子地区下寒武统烃源岩厚度分布(据文献[3])

Fig. 2 The thickness of Lower Cambrian source rocks in Yangtze area (from reference [3])

3 岩相古地理

下扬子安徽地区早寒武世的沉积大致分 3 个时期:前 Hsuaspis 期、Hsuaspis 期和沧浪铺末—龙王庙期^[9]。前 Hsuaspis 期相当于牛蹄塘期(梅树村期),沉积荷塘组下部。此时的和县—安庆地区为下扬子海的水下隆起带,主要沉积滨海局限台地相的白云岩;下扬子海和浙赣海主要沉积浅海盆地相灰黑色硅质页岩夹石煤层和含磷结核。天长—滁县、芜湖—石台和广德—休宁的广大区域都处于平静的浅海盆地环境,水流不畅、缺氧,沉积物具水平层理和微波状层理,生物种类少。

Hsuaspis 期相当于筇竹寺期—沧浪铺期,沉积了荷塘组和冷泉王组中部。这个时期和县—安庆地区仍为水下隆起带,处于潮坪环境,主要沉积物为白云岩,灰质白云岩。下扬子海主要为浅海陆棚相的页岩和钙质页岩沉积,具水平层理和微

波状层理,生物以三叶虫为主。水下隆起北侧处于浪基面以下的低能半氧化环境,南侧为浪基面之下的低能半还原环境。浙赣海主要为浅海盆地相灰黑色炭质泥页岩沉积,具水平和微波状层理并见有黄铁矿,含海绵骨针,反映了浪基面之下的低能还原环境。

沧浪铺末—龙王庙期这一时期相当于黄栗树组上段、冷泉王组上部、半汤组、黄柏岭组上段、大陈岭组。下扬子海和浙赣海均为滨浅海局限台地相沉积,主要沉积了一套灰色微细层理发育的白云质灰岩,含三叶虫。从 1919 年刘季辰和赵汝钧到 20 世纪 80 年代冯增昭等多位学者^[10]对江苏省寒武系进行岩石学和古地理岩相的研究认为,江苏南京地区下寒武统为陆表海台地型沉积,早寒武世的海侵主要都来自东北方向。

2015 年 6—9 月青岛海洋地质研究所开展的上下扬子陆地野外调查的最终目标是为了预测和评价南黄海海相中—古生界的烃源岩和储层。其中,在下扬子野外地质考察中我们发现,南京幕府山荷塘组出露约 35 m 的灰黑色泥岩,中间夹有一层厚约 10 m 的砂岩。荷塘组上部为一套高纯度的幕府山组白云岩(当地开采炼镁),这和以往对南京地区幕府山组的认知有所不同,事实上,幕府山组并不是烃源岩,真正的烃源岩是位于幕府山之下的荷塘组。另外,安徽青坑出露黄柏岭组为炭质页岩夹灰岩(图 3,表 1),总体表现为台地型沉积。

4 上升流的影响

海相烃源岩的优劣主要受原始生产力、沉积速率、海平面变化、上升流、海底热液活动、冰期、

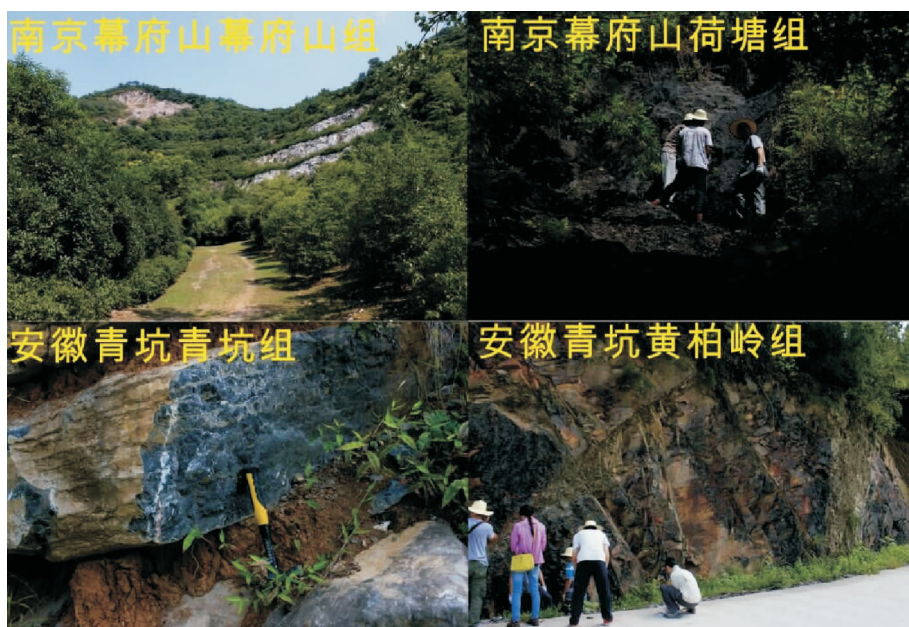


图 3 下扬子地区下寒武统烃源岩剖面

Fig. 3 A field section for Lower Cambrian source rocks in the Lower Yangtze area

沉积环境和保存条件等因素的控制^[11](李天义)。其中,上升流在海相烃源岩中起着关键作用。当南极周围富营养盐(硝酸盐和磷酸盐)和 SiO_2 的冷水团从高纬度区沿洋底流向低纬度区,在适当的大陆块斜坡区便会上升形成上升流,使那里成为高生物生产力区^[12]。古生代特提斯海中除上升流外,也有复杂的洋流体系,其中最主要的是低纬度自东向西流的南、北赤道暖流,暖流的长度、规模与目前太平洋中的南、北赤道暖流相当,它们由稳定的信风引起,至少已维持了 600 Ma^[13]。寒武一二叠纪,扬子地块正处在古特提斯海的低纬度东侧,低温、富营养盐和 SiO_2 的水体在它的东南缘上升,形成上升流。特别是在冰期,从高纬度流向低纬度的底层流强劲,低纬度上升流发育形成高峰期。因为上升流常引发缺氧事件,沉积的泥页岩富含有机质,有利于形成优质烃源岩,同时见石煤和磷矿^[14]。

5 烃源岩特征

5.1 烃源岩展布

徐旭辉等^[3]研究认为,下寒武统区域烃源岩为一套品质较好—好的烃源岩,在早古生代早期

陆块离散、扬子地台周缘区域拗陷沉降并接受大规模海侵背景下,面向古大洋方向的台缘斜坡—深海盆地发育的一套欠补偿沉积的黑色页岩,如牛蹄塘组。该套烃源岩 TOC 平均值达 3.43%,生烃母质以腐泥型、藻类占绝对优势。在中上扬子地区,其烃源岩厚度在 200~600 m 之间,主要分布在中上扬子古地台的南北缘。据梁狄刚^[15]的研究,下扬子地区寒武系呈 NE 向展布,存在 2 个中心:一个在南部的安吉—休宁深水陆棚区,厚度在 100~300 m,甚至 >300 m;另一个在北部的泰州—盐城深水陆棚区,厚度 50~150 m(图 4),向 NE 方向减薄。南部深水陆棚区向 SW 开口,北部向 NE 开口。休宁—安吉深水陆棚生物相以褐藻、红藻、海绵为主,含石煤。2 个深水陆棚发育于同生断裂下盘。从烃源岩厚度分布趋势看,南黄海盆地的南部应有该套烃源岩的发育,厚度应在 50~200 m 之间。

5.2 有机质类型和丰度

刘小平等^[16]研究表明:幕府山组黑色泥页岩为还原—强还原富藻黑色页岩相,干酪根类型主要为 I 型和 II₁ 型。通过对 36 个样品有机碳含量测试数据的统计分析(由于苏北地区钻遇幕府山组泥页岩探井较少,部分样品采自于苏南地区

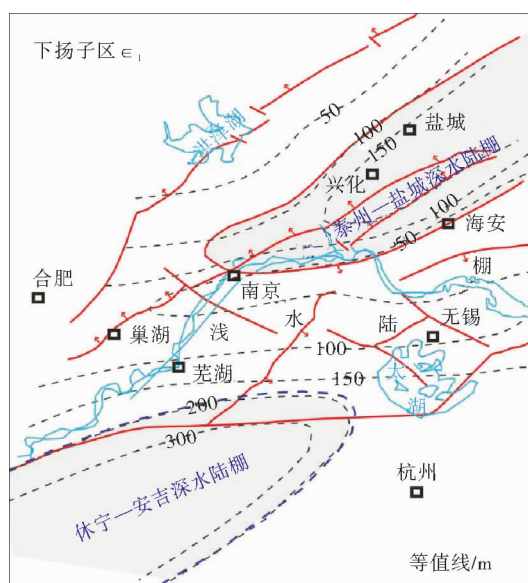


图4 下扬子早寒武世烃源岩分布(据文献[15])

Fig. 4 Distribution of Early Cambrian source rocks in the Lower Yangtze area (from reference [15])

野外露头),幕府山组黑色泥页岩有机质十分富集,有机碳的质量分数(TOC)最小值为0.66%,最大值为12.1%,平均值为3.32%。有机碳质量分数>1%的样品比例达92%(图5),其中S1井幕府山组泥页岩在2 701.24~2 701.8 m井段的有机碳质量分数为3.54%~4.40%,平均值为4.18%;在3 492.78~3 496.70 m井段有机碳的质量分数为2.36%~24.67%,平均值为3.40%;H2井幕府山组泥页岩在1 881.36~1 886.30 m

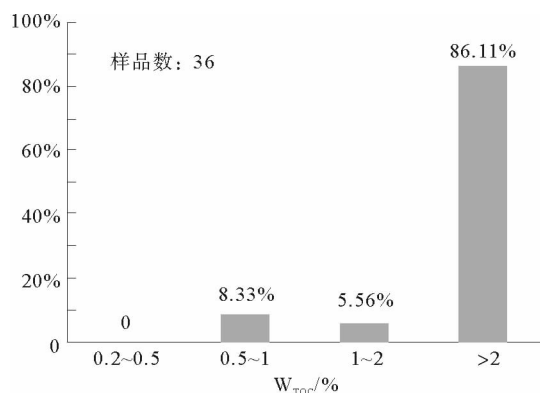


图5 苏北地区及周边下寒武统泥页岩有机碳含量分布特征(据文献[16])

Fig. 5 TOC distribution in mudstone and shale from Lower Cambrian Mufushan Formation in northern Jiangsu and surrounding areas (from reference [16])

井段的有机碳质量分数为2.75%~3.19%,平均值为2.88%。全椒地区露头下寒武统泥岩有机碳的质量分数为5.67%,石台-宁国地区露头下寒武统泥岩90%的样品中有机碳的质量分数>1%,最高可达12.1%。

5.3 烃源岩热演化

下古生界烃源岩一个显著特征是同一块样品存在着2组不同的沥青反射率,低组取值范围在2%~3.23%之间;高的一组在5.2%~9.41%之间。2组沥青反射率在同一样品出现,说明下扬子海相沉积过程至少经历了2次热演化过程^[17]。前期热演化过程的中断与后期该过程的继续之间有一个相当明显的间断过程。这种间断过程是一种构造抬升破坏过程,因此,下扬子海相盆地是一种构造改造型盆地,改造型海相盆地具有先后2次烃源岩热演化作用。不同岩性烃源岩热演化程度在同一热演化过程中有所差异,泥质烃源岩成熟度高于碳酸盐烃源岩成熟度。虽然碳酸盐岩排烃效率高于泥岩,但碳酸盐岩生烃量低,持续生烃时间较长^[18]。

另据林小云^[1]等研究发现,下扬子地区的中央台地两侧较中央台地演化程度高,如目前皖南隆起区在古生代处于盆地相,其演化程度高于北部的皖南凹陷区和苏南地区。因此,对于多期沉降和抬升剥蚀的地区,下古生界优质烃源岩成烃较早,早期热演化生成的烃若没有良好的保存条件,其生成的油气很难得以有效地保存,造成油气的散失。如下扬子宁国地区早古生代为盆地相,发育多套暗色泥岩,生烃条件十分优越。但同时也因为其地层厚度大,寒武系底埋深在三叠纪末已达到6 000 m以上,源岩已经到了过成熟阶段^[19],生烃过程相对偏早,属于生烃条件优越但贡献过早,是早期“古油藏”现今古沥青矿的烃源供给者。而演化程度缓慢的下古生界台地相区生烃条件相对差的部分烃源岩和上古生界烃源岩的生烃潜力得以保留,使得晚期继续生烃成藏,这是一种有效的“保存实力”,对晚期成藏有较大的贡献。前已述及,南黄海盆地在苏北盆地的东北方向,为扬子的主体部分,构造更加稳定。推测南黄海盆地下寒武统为滨浅海台地型沉积环境,其生烃期比陆域晚,可能存在二次生烃,或可形成较理

想的有效油气藏及页岩气藏。

6 结论

(1)因为早寒武世早期的热水沉积及上升流等因素的影响,下扬子地区早寒武世有机质来源丰富,在缺氧还原的沉积环境形成了一套优质烃源岩。南黄海作为下扬子的主体,推测存在优质的下寒武统烃源岩。

(2)早寒武世下扬子总体处于浅海台地相,安徽地区为滨浅海局限台地相沉积,从南到北依次为低能还原环境、和县—安庆水下隆起带潮坪环境、低能半还原环境、低能半氧化环境。南京为陆表海台地型沉积。海侵主要来自NE方向,推测南黄海也为浅海台地型沉积。

(3)下扬子地区寒武系呈NE向展布,存在2个中心,分别在安吉—休宁深水陆棚区和泰州—盐城深水陆棚区。2个深水陆棚发育于同生断裂下盘,向NE方向减薄。从陆域烃源岩厚度分布趋势看,南黄海盆地寒武系烃源岩发育,厚度在50~200 m之间。

(4)台缘相沉积环境生烃条件优越,烃源岩厚度大、埋深大、生烃早,生成的油气藏在中生代遭到破坏,是现今古沥青矿的烃源供给者。南黄海盆地台地相生烃条件相对较差、演化程度相对低,大部分烃源岩生烃潜力得以保留,对晚期成藏有较大的贡献。推测南黄海盆地地下寒武统烃源岩在燕山中—晚期存在二次生烃,有利于常规油气藏的保存。

参考文献:

[1] 林小云,刘建,陈志良,等.中下扬子区海相烃源岩分布与生烃潜力评价[J].石油天然气学报,2007,29(3):15-19.
[2] 蔡峰,熊斌辉.南黄海海域与下扬子地区海相中—古生界地层对比及烃源岩评价[J].海洋地质动态,2007,23(6):1-

6.

- [3] 徐旭辉,周小进,彭金宁.从扬子地区海相盆地演化改造与成藏浅析南黄海勘探方向[J].石油实验地质,2014,36(5):523-531,545.
[4] 胡书毅,马玉新,田海芹.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):33-38.
[5] 王建强,孙晶,肖国林,等.南黄海盆地构造特征及油气地质意义[J].海洋地质前沿,2014,30(10):34-39.
[6] 龚建明,王建强,李小豫,等.南黄海崆山隆起古生界页岩气远景区[J].海洋地质与第四纪地质,2013,33(6):115-120.
[7] 陈沪生.下扬子地区重建型海相烃源油气领域评价及勘探对策[J].海相油气地质,2002,7(2):33-41,5.
[8] 李刚,陈建文,肖国林,等.南黄海盆地海域的海相中—古生界油气远景[J].海洋地质动态,2003,19(8):12-16.
[9] 安徽省地矿局区域地质调查大队.安徽地层志(寒武系分册)[M].合肥:安徽科学技术出版社,1989:1-164.
[10] 江苏省地质矿产局.江苏省岩石地层[M].武汉:中国地质大学出版社,1997:42-68.
[11] 李天义,何生,杨智.海相优质烃源岩形成环境及其控制因素分析[J].地质科技情报,2008,27(6):63-70.
[12] 吕炳全,孙志国.海洋环境与地质[M].上海:同济大学出版社,1997:179-183.
[13] Lawrence A F. Climates throughout geologic time[M], Elsevier Scientific Publishing Company, 1979:11-151.
[14] 胡望水,吕炳全,王红罡,等.扬子地块东南陆缘寒武系上升流沉积特征[J].江汉石油学院学报,2004,26(4):9-11.
[15] 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].海相油气地质,2008,13(2):1-16.
[16] 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.
[17] 费富安.下扬子区下古生界(包括震旦系)生油岩中W型干酪根的地化特征及其意义[C]//油气勘探新理论、新方法、新技术报告论文集.北京:海洋出版社,1989:76-83.
[18] 费富安.下扬子区海相中、古生界油源岩及其有机质热演化规律研究[C]//中国地方油气勘查新领域探索论文集.第3辑.北京:地质出版社,1988:102-110.
[19] 傅宁.CZ35-2-1井古生界烃源岩地球化学参数异常分析[J].中国海上油气,2003,18(11):16-21.

CAMBRIAN SOURCE ROCKS IN THE LAND AREA OF YANGTZE BLOCK AND IMPLICATIONS FOR OIL AND GAS EXPLORATION IN THE SOUTH YELLOW SEA

CHENG Qingsong¹, GONG Jianming^{2,3*}, LI Zhigao⁴, CHEN Jianwen^{2,3}, ZHANG Min¹,
CHEN Zhiqiang², TIAN Ruicong²

(1 School of Earth Environment and Water Resources, Yangtze University, Wuhan 430100, China;

2 Qingdao Institute of Marine Geology, CGS, Qingdao 266071, China;

3 Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China;

4 Institute of CNOOC Shenzhen Branch, Guangzhou 510240, China)

Abstract: The Lower Yangtze block and the Cathaysian block drifted towards the north during Early Cambrian and then the paleo-continent of South China(OCSC) formed. The Northern Yangtze block (or the Lower Yangtze area), however, remained unaffected as a shallow marine carbonate platform. It was rich in organic matter in Early Cambrian due to some factors, such as the prevailing upwelling current. As the result, a set of hydrocarbon source rocks was formed in an anoxic marine environment. There were two Early Cambrian depocenters for hydrocarbon source rocks in the region along the north-east direction, one in Anji-Xiuning deep-water shelf area, where the source rocks were about 100~300 m in thickness; and another one in Taizhou-Yancheng deep-water shelf area, with a thickness within 50~150 m. Transgression was in NE direction together with the thinning out of the source rocks. It was estimated that the source rocks were around 50—200m in thickness in the South Yellow Sea. Most of the Paleozoic oil reservoir had been probably damaged when OCSC collided with the North China paleo-land in Mesozoic. The Auxi Formation was deposited in the slope area around the platform, which were favorable for hydrocarbon generation, but the oil and gas reservoirs were destroyed in Mesozoic. The South Yellow Sea was then deposited with shallow marine carbonate facies, which were not good enough for hydrocarbon generation, but survived from the collision. It could make contribution to the formation of reservoirs in later stage. We speculated that the Lower Cambrian hydrocarbon source rocks in the South yellow sea, which were shallowly buried during the continental margin stage to the collision stage, could experience the second hydrocarbon-generation in the middle-late Yan Shan movement, and very likely formed a substantial oil and gas reservoirs.

Key words: source rocks; Early Cambrian; South Yellow Sea; Lower Yangtze land area