

DOI:10.16788/j.hddz.32-1865/P.2022.02.003

引用格式:彭晓东,徐锦龙,方朝刚,等. 宣广盆地中二叠世栖霞组层序地层特征及页岩气勘探前景[J].华东地质,2022,43(2):154-166.(PENG X D, XU J L, FANG C G, et al. Sequence stratigraphic characteristics and shale gas exploration prospect of Middle Permian Qixia Formation in the Xuancheng-Guangde Basin[J].East China Geology, 2022, 43(2):154-166.)

宣广盆地中二叠世栖霞组层序地层特征及页岩气勘探前景

彭晓东¹,徐锦龙¹,方朝刚²,沈仕豪¹,章诚诚²

(1.安徽省地质调查院,安徽 合肥 230001;

2.中国地质调查局南京地质调查中心,江苏 南京 210016)

摘要:对宣广盆地中二叠世栖霞组进行层序地层学分析,结合栖霞组富有机质页岩(泥)岩有机地球化学特征,评价页岩气勘探前景。研究表明:区内栖霞组可分为 3 个三级层序;每个层序划分出海侵体系域、凝缩段和高水位体系域,代表了一次相对较大的海平面升降旋回。富有机质页岩(泥)岩主要分布于凝缩段、凝缩段与海侵体系域或高水位体系域的转换过渡层段。栖霞组富有机质页岩(泥)岩厚 8~35 m,TOC 值 0.77%~9.49%,有机质成熟度为 1.428%,脆性矿物(石英、长石)相对富集,具有良好的脆性和可压性,页岩气成藏条件良好,特别是栖霞组五段具有巨大的资源潜力。

关键词:层序地层;页岩气;栖霞组;安徽省宣广盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

文章编号:2096-1871(2022)02-154-13

层序地层学作为一种新兴的、具有完整理论体系的对比分析方法,为精确的地层对比划分、岩相古地理再造及油气勘探提供了新理论,已成为油气勘探的重要理论和手段之一^[1]。三级层序是层序地层学研究的主要对象和基本层序地层单位,常以不整合面或可与其对比的整合面为界,是一套相对统一、具有成因联系的地层系列^[2],平均时间延续一般为 2~5 Ma^[3]。华南中二叠世栖霞组是在全球石炭纪一二叠纪冰期极地冰盖逐渐消融、大规模海侵背景下形成的一套特殊的碳酸盐岩地层^[4]。前人先后通过沉积学^[5-8]、地球化学^[9-12]、烃源岩^[13-14]和层序地层学^[5,15-16]等对其进行了初步的研究,取得了丰硕的成果。但栖霞组层序地层学的研究存在较大的分歧,具体体现在三级层序划分的差异上:魏国

齐等^[17]对扬子地块西北缘二叠纪栖霞组划分为 1 个三级层序;孟庆芬等^[18]对贵州南部、梅冥相等^[19-20]对滇黔桂盆地及邻区、白晓亮等^[21]和胡笙等^[16]对四川盆地二叠系进行层序地层研究,将栖霞组划分为 2 个三级层序;覃建雄等^[22]对西南地区、李祥辉等^[23]对中国南方、杜小弟等^[24]对安徽巢湖地区、张克信等^[25]对中下扬子地区、周雁等^[26]对中扬子地区和丁枫等^[27]对黔南拗陷地区的栖霞组均划分为 3 个三级层序;田望学等^[28]将鄂西南栖霞组分为 3.5 个三级层序;何海清^[15]对浙江省、颜佳新等^[5]对湖北省和马永生等^[1]对中国南方的栖霞组均划分为 4 个三级层序。以上划分差异的形成与栖霞组古地理位置、层序界面的识别、层序划分和层序级别等方面的研究具有较为密切的联系^[29-30]。

* 收稿日期:2021-05-18 修订日期:2021-11-02 责任编辑:叶海敏

基金项目:中国地质调查局“长江中下游成矿带安庆—盱眙地区地质矿产调查(编号:1212011120848)”、“苏皖地区页岩气地质调查(编号:DD20190083)”和安徽省矿山生态修复工程实验室开放课题(编号:KS-2021-002)项目联合资助。

第一作者简介:彭晓东,1986 年生,男,工程师,硕士,主要从事矿产地质调查工作。Email:pxdlengsha@126.com。

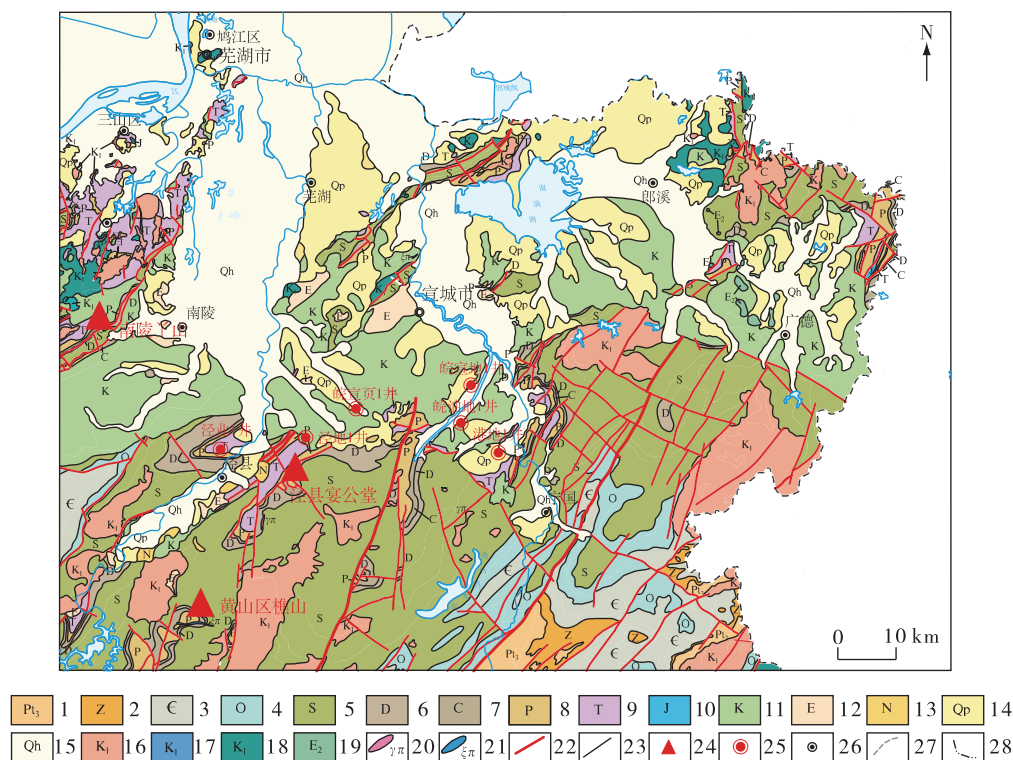
通信作者简介:徐锦龙,1985 年生,男,高级工程师,硕士,主要从事区域地质与油气地质调查工作。Email:xujinlong0909@126.com。

华南中二叠世栖霞组海相烃源岩是中国南方 4 套区域性烃源岩的重要组成部分^[31-32]。近年来,中国地质调查局南京地质调查中心和中国地质科学院地质力学研究所安徽省宣广盆地实施了皖港地 1 井、皖油地 1 井、皖泾地 1 井等调查井工作,在二叠纪孤峰组、龙潭组、大隆组和三叠纪殷坑组取得了“三气一油”的重要发现,为下扬子地区页岩气勘探提供了基础地质资料^[33-39]。随着地表调查和深部钻井的研究,发现宣广盆地栖霞组存在富有机质页(泥)岩,呈夹层或薄弱层不均匀分布,局部厚度可达 30 m,是传统的优质海相烃源岩,因此,栖霞组也是页岩气赋存的有利层位。在宣广盆地二叠系已获得页岩气重要突破的前提下,针对上述三级层序划分中存在的问题,加强栖霞组富有机质页(泥)岩层序地层学和页岩气潜力研究,对下扬子地区页岩气目标层的研究和勘探开发具有重要意义。

本文采用露头层序地层学原理和方法,选择黄山区樵山栖霞组进行露头层序地层研究,并与周边剖面进行区域对比,结合富有机质页(泥)岩有机地球化学参数,评价栖霞组页岩气勘探潜力,为下扬子地区页岩气地质调查和井位布置提供基础地质资料。

1 区域地质概况

宣广盆地位于扬子板块东部,大地构造上江南造山带与沿江褶皱带交汇处,南部以周王断裂为边界,东部与天目山脉相邻,北部与茅山断裂接壤,西部与南陵盆地相邻(图 1)。盆地呈 NE 向不规则状展布,西南缘主要出露古生代—中生代碳酸盐岩和碎屑岩。盆地具“北断南超”、“北深南浅”的特征,基底由志留纪—三叠纪地层组成,盆地内沉积晚白垩世—上新世地层,由山前坳陷发展为“箕状”断陷盆地,至新近纪发生构造反转而盆地消亡。



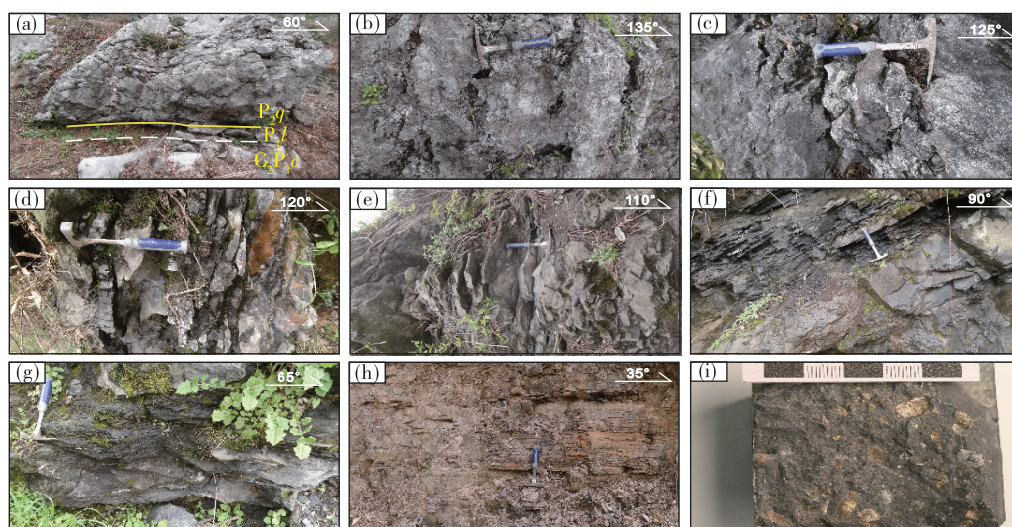
- 1.南华系和青白口系;2.震旦系;3.寒武系;4.奥陶系;5.志留系;6.泥盆系;7.石炭系;8.二叠系;9.三叠系;10.侏罗系;11.白垩系;12.古近系;13.新近系;14.更新统;15.全新统;16.早白垩世中酸性岩体;17.早白垩世中性岩体;18.早白垩世火山岩;19.始新世火山岩;20.花岗斑岩;21.正长斑岩;22.断裂;23.地质界线;24.剖面位置;25 钻孔位置;26.地名;27.县界;28.省界

图 1 宣广盆地地质简图及剖面位置图

Fig. 1 Geological sketch map and section location of the Xuancheng-Guangde Basin

华南栖霞组分布广泛,厚度、岩性和岩相稳定,具有富含有机质和燧石结核的特征^[40],是下扬子地区代表性碳酸盐岩和页岩烃源岩之一。根据其岩性、岩相和古生物组合,从下至上大体分为 5 个岩性段,与下伏早二叠世梁山组(图 2(a))和上覆中二叠世孤峰组均呈整合接触。栖霞组岩性为深灰色-灰

色厚层-块状沥青质含生物碎屑灰岩(图 2(b))、含生物碎屑灰岩、含燧石结核-条带灰岩(图 2(c)、图 2(d))夹硅质岩、碳质页岩,整体反映了栖霞期台地相碳酸盐岩向孤峰期陆棚相硅质岩转换、一次完整的海侵开始并持续扩大的演化阶段,并伴随着多期次一级海侵—海退旋回。



(a).梁山组(C_2P_1c)与梁山组(P_1l)呈平行不整合接触,梁山组(P_1l)与栖霞组(P_2q)呈整合接触;(b).疙瘩状沥青质含生物碎屑灰岩;(c).含燧石结核生物碎屑灰岩;(d).含燧石条带生物碎屑灰岩;(e).含生物碎屑灰岩夹碳质页岩;(f).碳质页岩与含生物碎屑灰岩互层;(g).含生物碎屑灰岩夹碳质页岩;(h).碳质泥岩;(i).碳质泥岩内腕足类化石

图 2 黄山区樵山中二叠世栖霞组岩性与化石特征

Fig. 2 Lithologic characteristics and fossils of Middle Permian Qixia Formation in Qiaoshan, Huangshan area

2 层序地层划分及特征

根据露头层序地层原理,考虑层序界面、体系域特征、区域对比性^[1],对宣广盆地的黄山区樵山剖面栖霞组层序进行了详细研究,共识别出 3 个三级层序(PSQ2-PSQ4)。其中 TST 为海侵体系域(transgressive systems tract),CS 为凝缩段(condensed section),HST 为高水位体系域(highstand systems tract),SB II 为二级层序界面(sequence boundary)(图 3),反映了栖霞期具有 3 次较大的海平面变化。栖霞组相当于罗甸阶(空谷阶)和祥播阶(2/3 罗德阶),时限为 9.3 Ma (279.3 ~ 270.0 Ma)^[41],平均每个三级层序约为 3.1 Ma,这与三级层序平均时间延续(2~5 Ma)基本一致^[42-43]。

2.1 层序 1(PSQ2)

该层序相当于栖霞组一段、二段和三段中下部地层,层序底界面为 SB II (图 2(a)),具体层序体系

域格架如下。

(1)TST。下部灰色-深灰色中厚层-厚层生物碎屑粒泥灰岩夹生物碎屑泥灰岩,产较多的腕足类、腹足类、有孔虫和海百合化石,保存较为完整;中部深灰色-灰黑色厚层泥质微晶灰岩、含生物碎屑灰岩,偶见有孔虫和腹足类;上部灰色-深灰色-灰黑色厚层生物碎屑粒泥-泥粒灰岩;顶部为灰色-深灰色厚层疙瘩状沥青质含生物碎屑泥质微晶灰岩(图 2(b)),产有孔虫、菊石、腕足类和海百合等化石。

(2)CS。深灰色-灰色薄层微晶灰岩与灰黑色-黑色薄层硅质岩互层,向上渐变为灰黑色-黑色中薄层-薄层硅质岩夹条带状泥质灰岩。

(3)HST。灰色-深灰色中厚层含燧石条带结核泥微晶灰岩(图 2(c))、含生物碎屑微晶灰岩夹碳质页岩(图 2(e)),产有孔虫、腕足类、藻类、介形虫和壳类化石。



Fig. 3 Sequence division and characteristics of Middle Permian Qixia Formation in Qiaoshan, Huangshan Area

2.2 层序 2(PSQ3)

相当于栖霞组三段中上部、四段和五段下部地层,层序底界面为 SBⅡ,具体层序体系域格架如下。

(1)TST。深灰色-灰黑色中厚层-厚层生物碎屑粒泥灰岩、含燧石结核灰岩、泥微晶灰岩,局部夹碳质页岩,产有孔虫、棘皮动物、藻类、腕足类化石。

(2)CS。灰黑色-黑色薄层硅质岩夹薄层泥微晶灰岩。

(3)HST。深灰色-灰黑色中薄层含燧石条带灰岩(图 2(d))、泥微晶灰岩,偶见有孔虫、腕足类和棘皮动物化石。

2.3 层序 3(PSQ4)

相当于五段中上部地层,层序底界面为 SBⅡ,具体层序体系域格架如下。

(1)TST。下部为深灰色-灰黑色中层厚层含燧石结核生物碎屑泥粒灰岩夹碳质页岩(图 2(g));上部为灰黑色-黑色中厚层-块状碳质泥岩与深灰色-灰黑色中厚层-厚层泥质微晶灰岩不等厚互层。产有孔虫、棘皮动物和藻类化石。

(2)CS。灰黑色-黑色块状碳质泥岩、含硅质碳质泥岩(图 2(h)),产腕足类(图 2(i))化石。

(3)HST。灰色-深灰色中厚层-厚层含硅质条带泥质灰岩、含燧石结核硅质条带泥微晶灰岩,局部夹碳质页岩(图 2(f)),产有孔虫、腕足类和棘皮动物化石。

以上说明,宣广盆地栖霞组沉积时,基本无陆源碎屑的输入,构造稳定,无火山活动,主要受控于全球海平面变化、古气候、古环境和古水文条件的

影响。栖霞组不同程度富含灰泥成分,生物含量不一,门类多样且整体保存较好,局部发育黄铁矿和富有机质页(泥)岩,反映了整体为安静受局限的贫氧沉积环境,局部为缺氧还原的沉积环境。阵发性和周期性的燧石结核、燧石条带和硅质岩与生物碎屑(门类丰富)共同富集,可能指示了燧石的形成与水质条件的变化有较为密切的关系,并非盆地内部因素,不能作为深水的标志。富有机质页(泥)岩的出现,常伴随着黄铁矿的发育和单一的生物门类,可能指示了较深的水体环境。

栖霞组内 3 次相对较大海平面变化对应于 VAIL P R 等^[42]的三级海平面变化,与北美阿丁斯克期海平面变化基本一致^[43],说明它们是全球冰川性海平面变化的结果,与华南乃至北美同期海平面变化曲线具有较好的吻合性。

3 富有机质页(泥)岩地球化学特征

3.1 富有机质页(泥)岩地层特征

研究区在栖霞组三段下部与上部和五段中部发现厚度不一的碳质页(泥)岩层,其中以五段中部尤为典型,区域上具有很好的稳定性,厚 25~40 m 不等,岩性为灰黑色-黑色中厚层碳质泥岩、含硅质碳质泥岩,局部夹泥灰岩,内部产丰富的腕足类化石。

栖霞组三段主体为开阔台地-台凹相沉积,局部呈陆棚相沉积,沉积了少量碳质页(泥)岩(表 1)。栖霞组五段主要为陆棚相沉积,沉积厚达 30 余 m 的碳质泥岩层(表 1)可作为页岩气目标层。

表 1 栖霞组富有机质页(泥)岩地层取样层位及特征

Table 1 Sampling horizon and characteristics of organic rich shale in Qixia Formation

序号	样品编号	层位	厚度/m	岩性特征
1	PM06-Y6	三段下部	7.8	深灰色-灰黑色薄层-中薄层生物碎屑粒泥灰岩与灰黑色-黑色薄层碳质页岩互层
2	PM06-Y22	三段上部	34.4	灰色-深灰色中厚层泥微晶灰岩与灰黑色-黑色中厚层-厚层碳质页岩互层
3	PM06-Y31	五段下部	12.4	灰黑色-黑色中厚层-块状碳质泥岩与深灰色-灰黑色中厚层-厚层泥质灰岩不等厚互层
4	PM06-Y32	五段中部	30.6	灰黑色-黑色块状碳质泥岩
5	PM06-Y33	五段上部	8.6	深灰色-灰黑色中厚层含硅质生物碎屑泥灰岩与灰黑色-黑色厚层碳质泥岩不等厚互层

3.2 富有机质页(泥)岩有机地球化学分析

本次研究共选取栖霞组三段和五段的 5 件新鲜富有机质页(泥)岩样品,用切割机除去表层,选用中间无裂隙且相对坚硬的部分,粉碎至 2 cm³ 左右

的小块,仔细挑选 1~2 cm³ 的页(泥)岩碎屑,避开次生的方解石和石英脉,并用离子水进行 3 次振荡清洗后烘干,再利用颚式破碎机一次性高效破碎至 2 mm(10 目)以下,使用来复缩分器,按“1/2+1/4+

1/8……”手工多次缩分出 300 g 已破碎的样品用以研磨,用无污染钵在振动研磨机上研磨至 85% 以上达到 75 μm (200 目)。

本次总有机碳(total organic carbon, TOC)含量测定、岩石热解、有机质成熟度和全岩 X 射线衍射分析均在长安大学完成。其中,TOC 含量测定利用 LECOCS-400 碳硫分析仪,测试流程遵循《GB/T 19145—2003 沉积岩中总有机碳的测定》^[44];岩石热解借助 Rock-Eval 热解仪进行;有机质成熟度由 CRAIC 显微光度计的测定;全岩 X 射线衍射分析采用 XD-2 型衍射仪完成。

3.2.1 富有机质页(泥)岩有机质丰度

有机质丰度指标主要包括有机碳含量和氯仿沥青“A”。由于我国海相地层发育时代早,经历的构造运动多,残留氯仿沥青“A”含量普遍很低,多采用有机碳含量对海相页岩进行评价。

有机质含量是影响页岩气富集的一个根本性因素,不仅决定着页岩的生气量,也直接影响页岩的含气量。因为页岩中有机质含量对气体具有重要的吸附作用,大量的气体就是以吸附形式存在于干酪根表面,因此,高的 TOC 就意味着高的生气量和吸附量。美国 5 大页岩具有丰富的有机质含量,其 TOC 大多为 1.5% ~ 20%^[45]。通常认为总有

机碳含量超过 0.5% 的页岩是有潜力的烃源岩^[45],蒋裕强等^[46]则提出 TOC 至少应为 2%。

分析测试结果(表 2)表明,野外露头的栖霞组三段黑色页(泥)岩总有机碳含量较低,TOC 值为 0.77% ~ 1.03%;五段黑色泥岩有机碳含量较高,TOC 值为 4.86% ~ 9.49%,特别是厚达 30 m 的碳质泥岩层 TOC 值为 9.49%,表明研究区栖霞组富有机质页(泥)岩具有高的生气量和吸附量,页岩气资源潜力较好。

表 2 栖霞组页(泥)岩总有机碳和总硫测试结果

Table 2 Results of TOC and total sulfur in the Qixia Formation shale

序号	样品编号	总有机碳/%	总硫/%
1	PM06-Y6	1.03	0.13
2	PM06-Y22	0.77	0.02
3	PM06-Y31	0.81	0.57
4	PM06-Y32	9.49	0.13

岩石热解分析结果(表 3)表明:栖霞组富有机质页(泥)岩生烃潜量(S1+S2)为 0.05%~0.09%,母质页岩干酪根为Ⅲ型,上部页岩较下部页岩高,可能与沉积环境差异有关;热解峰温 Tmax 为 434~498 $^{\circ}\text{C}$,反映栖霞组页岩整体处于成熟-高成熟的生油气阶段。

表 3 栖霞组页(泥)岩热解分析结果

Table 3 Results of rock pyrolysis in the Qixia Formation shale

编号	可溶烃	热解烃	最高峰温	产油潜率	残余碳	有机碳	母质类型	产率指数	氢指数	降解率	烃指数
	S1/%	S2/%	Tmax/ $^{\circ}\text{C}$	S1+S2/%	S4/%	TOC/%		PI	HCI/%	D/%	
PM06-Y6	0.03	0.05	498	0.08	3.26	0.33	Ⅲ	0.38	15	2.00	9.02
PM06-Y22	0.03	0.05	476	0.08	8.37	0.84	Ⅲ	0.38	6	0.79	3.56
PM06-Y31	0.01	0.04	421	0.05	0.38	0.04	Ⅲ	0.20	95	9.85	23.73
PM06-Y32	0.03	0.06	443	0.09	43.06	4.31	Ⅲ	0.33	1	0.17	0.70
PM06-Y33	0.02	0.07	434	0.09	90.68	9.08	Ⅲ	0.22	1	0.08	0.22

3.2.2 富有机质页(泥)岩有机质成熟度

有机质成熟度是衡量页岩实际生烃能力的重要指标,决定着页岩有机质向烃类的转化程度^[47],常以有机质镜质体反射率(Ro)来确定有机质的成熟度。

Ro 是目前评价有机质成熟度的最佳参数,具有不可逆性,且 Ro 随着热演化程度的升高而稳定增大,可以较为准确的确定有机质的成熟度^[48]。一般认为,Ro=0.5%是石油生成的下限,Ro<0.5%时处于低成熟阶段,Ro=0.5%~1.3%是成熟带(石

油主要生成带),Ro=1.3%~2.0%是高成熟带(湿气带及凝析油带),Ro>2.0%是过成熟带(干气带)^[49-50]。研究区栖霞组富有机质页(泥)岩热演化程度目前未知,5 组数据中仅获 1 组 Ro 值,为 1.428%,显示栖霞组为高成熟阶段,具有良好的页岩气资源潜力。

3.3 富有机质页(泥)岩全岩 X 射线衍射分析

页岩是由多种矿物组成的,其中包含大量的黏

土矿物、长石、石英及自生矿物,矿物组成决定着页岩气藏的品质,影响着气体的含量^[51]。

根据全岩 X 射线衍射分析结果显示(表 4),研究区栖霞组富有机质页(泥)岩的主要矿物为黏土(50.8%~64.1%,平均值 55.5%)、石英(30.8%~38.1%,平均值 34.6%)、长石(3.5%~14.2%,平均值 9.8%)。其中,钾长石含量为 1.9%~6.6%,平均值 4.6%;斜长石含量为 1.6%~9.3%,平均值 5.2%;方解石仅在 YP06—Y22 中可见,含量 0.8%,其他样品未见。

表 4 栖霞组页(泥)岩 X 衍射分析结果

Table 4 X-ray diffraction results of Qixia Formation shale

样品编号	矿物含量/%				
	黏土	石英	钾长石	斜长石	方解石
PM06-Y6	52.6	38.1	6.4	2.9	
PM06-Y22	54.8	35.1	4.8	4.5	0.8
PM06-Y31	55.0	30.8	6.6	7.6	
PM06-Y32	64.1	32.4	1.9	1.6	
PM06-Y33	50.8	36.4	3.5	9.3	

总之,栖霞组富有机质页(泥)岩内脆性矿物(石英、长石)的含量较高,储层脆性系数一般为 0.4 左右^[52],显示良好的脆性和可压性,有利于后期压裂造缝。

4 宣广盆地富有机质页(泥)岩层序地层特征

在充分收集前人岩石地层、生物地层、沉积学及层序地层学等多方面资料的基础上,利用地层剖面测制和 1:5 万地质填图工作对宣广盆地栖霞组开展三级层序地层的划分(图 4),为后期层序地层格架的建立和富有机质页(泥)岩分布规律的总结奠定了地质基础。

4.1 栖霞组三级层序对比

由图 3、图 4 可以看出,宣广盆地栖霞组可划分为 3 个三级层序,其界面性质的演化为:栖霞组与下伏梁山组呈整合接触,或与下伏船山组呈平行不整合接触,底界面属 II 型层序界面(SB II);三级层序体系域均发育海侵体系域、凝缩段和高水位体系域,海侵体系域和高水位体系域具有较好的对比性,凝缩段对比性较差;栖霞组岩性大体相似,自北西向南东(南陵丫山—泾县宴公堂—黄山区樵山)

沉积厚度逐渐变厚,硅质层段(二段和四段)由北西向南东逐渐变薄,显示沉积水体逐渐变浅;地层岩性也存在一定的差异,五段在泾县宴公堂未见燧石结核,在黄山区樵山见碳质页(泥)岩和燧石条带泥质灰岩,可能与其古地理位置有较为密切的关系,往南沉积水体相对较深。

4.2 富有机质页(泥)岩发育特征

宣广盆地有机质页(泥)岩主要发育于栖霞组三段上部、三段下部、五段中部,主要分布于凝缩段及其上下层位。

从三级层序和富有机质页(泥)岩对比图(图 4)可以发现:富有机质页(泥)岩主要发育于 PSQ4 的凝缩段;其它层位较为零星,且厚度较薄,发育于凝缩段、凝缩段与海侵体系域和高水位体系域的转换过渡层段;自北西向南东,富有机质页(泥)岩层数逐渐增多,总厚度和单层厚度也逐渐增厚;沉积水体越深越有利于富有机质页(泥)岩的沉积,富有机质页(泥)岩与水体和古地理位置存在较为密切的关系。

5 宣广盆地页岩气成藏地质条件

页岩气远景区优选指标的标准是^[53]:海相富有机质页(泥)岩层段连续厚度应 >15 m,平均含气量 >0.5 m³/t,有机碳含量(TOC) $\geq 1.0\%$,镜质体反射率 $R_o=0.5\%\sim 3.5\%$,含气量 >0.5 m³/t,埋深 $<4\ 500$ m,地表条件地形高差小,保存条件中等—好。依据上述标准,本文对宣广盆地栖霞组富有机质页(泥)岩进行了以下初步评价:

(1) 富有机质页(泥)岩总厚度 >50 m,且五段中部厚度超过 30 m,填图追踪厚度具有很好的稳定性,为良好的目标层。

(2) 富有机质页(泥)岩的 TOC 值 0.77%~9.49%,其中五段 TOC 值 4.86%~9.49%。

(3) 富有机质页(泥)岩的 R_o 值是 1.43%,为高成熟阶段。

(4) 富有机质页(泥)岩全岩 X 衍射分析显示脆性矿物(石英、长石)相对富集,有利于产生微裂缝(天然或诱导裂缝)和后期压裂造缝,具有良好的页岩气前景。

(5) 根据皖港地 1 井、皖油地 1 井、宣地 1 井、宣页 1 井和皖泾地 1 井等钻孔和地震剖面资料显示,栖霞组整体埋深为 1 000~4 500 m^[37,39],宣广盆

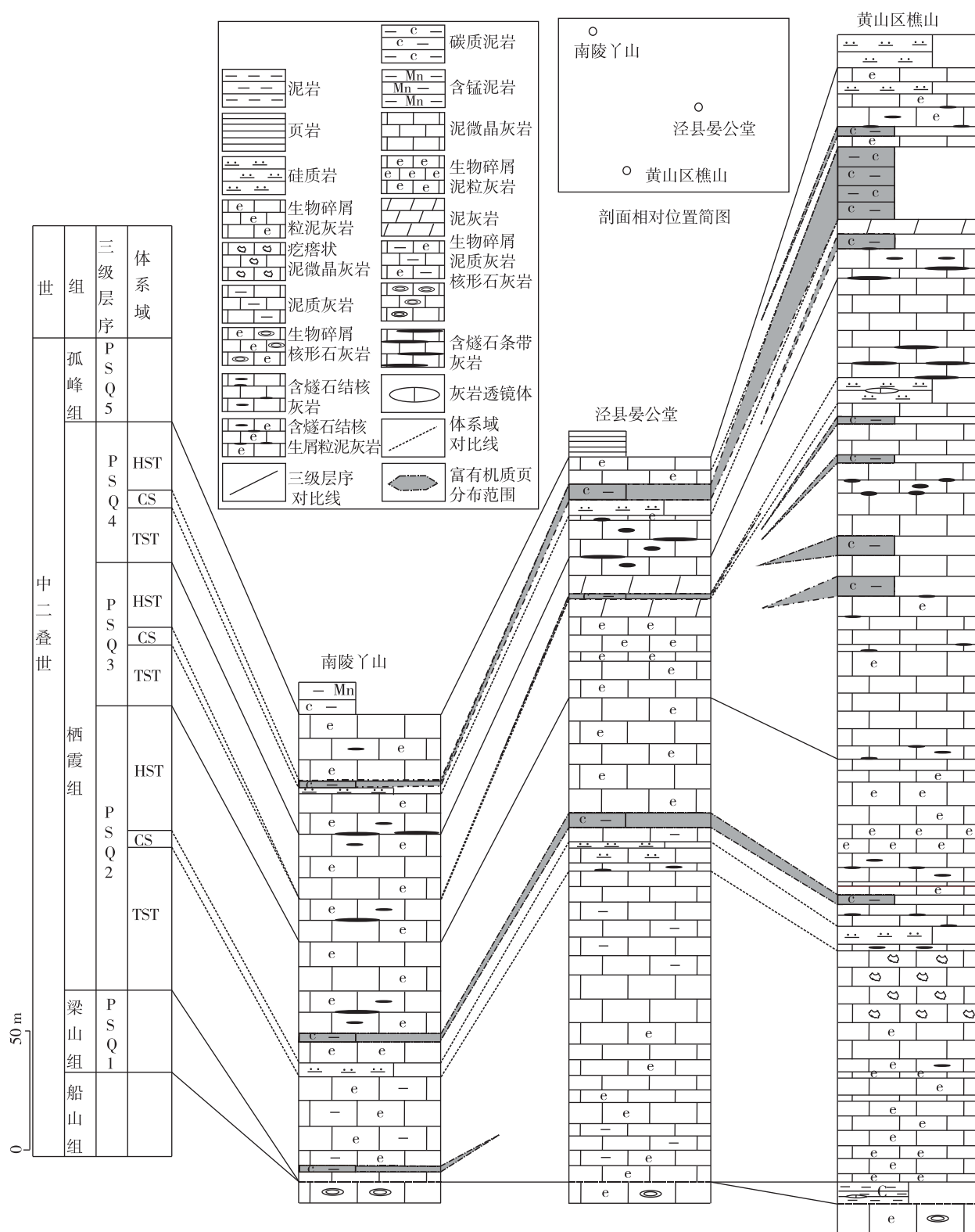


图 4 宣广盆地二叠世栖霞组三级层序及富有机质页(泥)岩对比图

Fig. 4 Comparison columns of the third-order sequence and organic-rich shale of Middle Permian Qixia Formation in the Xuancheng-Guangde Basin

地内栖霞组面积应 $>2\ 000\text{ km}^2$ 。

(6) 盆地地形条件较好,断裂局部发育,整体保存条件较好。

综上所述,栖霞组富有机质页(泥)岩厚度、TOC、Ro、岩石矿物学特征和保存条件等相对较好,尤以五段中上部富有机质页(泥)岩最佳,是值得关注的页岩气目标层。根据区域栖霞组及其页(泥)岩的展布情况,富有机质页(泥)岩呈现北西向南东最厚的趋势,表明江南断裂带以南的宣广盆地乃至江西、浙江省局部可能具有良好的页岩气勘探潜力^[1,13]。栖霞组沥青质灰岩和富有机质页(泥)岩是中国南方四套海相烃源岩的重要组成部分,四段和五段沉积厚度不大,但富有机质页(泥)岩发育,因此,在华南页岩气勘探中值得关注,在页岩气调查井和参数井布置中,应以揭穿栖霞组四段硅质层为佳。

6 结论

(1) 宣广盆地中二叠世栖霞组可划分为 3 个三级层序(PSQ2—PSQ4),每个层序划分出 TST、CS 及 HST,反映了 3 次相对较大的海平面升降旋回,是全球冰川性海平面变化的结果。富有机质页(泥)岩主要发育于凝缩段、凝缩段与海侵体系域或高水位体系域的转换过渡层段,并呈现自北西向南东页(泥)岩层数增多、厚度增厚的趋势。

(2) 栖霞组富有机质页(泥)岩主要分布于三段上部、下部和五段中部,厚 8~35 m, TOC 值 0.77%~9.49%,具有高的生气量和吸附量。有机质成熟度为 1.428%,为高成熟阶段。脆性矿物(石英、长石)相对富集,具有良好的脆性和可压性,有利于后期压裂造缝。页岩气资源潜力较好,为良好的页岩气目标层。

(3) 栖霞组富有机质页(泥)岩的厚度、埋深、脆度、有机质丰度和成熟度等参数表明其页岩气成藏地质条件良好,具有巨大的资源潜力,二叠纪页岩气调查井和参数井应以揭穿栖霞组四段硅质层为宜。

参考文献

- [1] 马永生,陈洪德,王国力,等.中国南方层序地层与古地理[M].北京:科学出版社,2009:137-180.
MA Y S, CHEN H D, WANG G L, et al. Sequence stratigraphy and paleogeography of the Southern

- China[M]. Beijing: Science Press, 2009: 137-180.
- [2] SHANLEY K W. Perspective on the sequence stratigraphy of continental strata[J]. AAPG Bulletin, 1994, 78(4): 544-568.
- [3] HAU B U. Mesozoic and Cenozoic chronostratigraphy and eustatic cycles[M]. Sea-Level Changes: An Integrated Approach, 1988: 71-108.
- [4] 刘宝珺,朱同兴.安徽中南部二叠统栖霞组和孤峰组沉积环境及成岩历史[J].成都地质学院学报, 1990(1): 5-12.
LIU B J, ZHU T X. Sedimentary environments and diagenetic history of Qixia and Gufeng Formations, Lower Permian in central and southern Anhui SE China[J]. Journal of Chengdu College of Geology, 1990(1): 5-12.
- [5] 颜佳新,方念乔.湖北省栖霞组沉积环境、沉积旋回及层序地层划分[J].地球科学, 1994(5): 620-626, 718.
YAN J X, FANG N Q. Depositional environment, cycle and sequence of Chihshia Formation in Hubei Province[J]. Earth Science, 1994(5): 620-626, 718.
- [6] 李双应,洪天求,金福全,等.巢县二叠系栖霞组臭灰岩段异地成因碳酸盐岩[J].地层学杂志, 2001(1): 69-74.
LI S Y, HONG T Q, JIN F Q, et al. Allochthonous carbonate rocks in the swine limestone member of the Permian Chihshia Formation of Chaohuan, Anhui[J]. Journal of Stratigraphy, 2001(1): 69-74.
- [7] 李双应,岳书仓.安徽巢湖二叠系栖霞组碳酸盐岩斜坡沉积[J].沉积学报, 2002(1): 7-12.
LI S Y, YUE S C. Sedimentation on a Carbonate Slope of Permian Qixia Formation in Chaohu Region, Anhui[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2002(1): 7-12.
- [8] 杨锐,李红,柳益群,等.安徽巢湖地区中二叠统栖霞组灰岩中燧石成因[J].现代地质, 2014, 28(3): 501-511.
YANG R, LI H, LIU Y Q, et al. Origin of Nodular Cherts in Limestones in Middle Permian Qixia Formation, Chaohu, Anhui Province[J]. Geoscience, 2014, 28(3): 501-511.
- [9] 施春华,胡瑞忠,颜佳新.栖霞组沉积地球化学特征及其环境意义[J].矿物岩石地球化学通报, 2004(2): 144-148.
SHI C H, HU R Z, YAN J X. Sedimentary Geochemistry of the Qixia Formation and its Environmental Implication[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2004(2): 144-148.
- [10] 何雨暘,赵广涛,赵利,等.巢北地区二叠系栖霞组碳酸盐岩地球化学特征及其古环境意义[J].中国海洋大学学报(自然科学版), 2014, 44(5): 79-88.

- HE Y M, ZHAO G T, ZHAO L, et al. Geochemical characteristics and Paleo-Environment Significance of Qixia Formation in Chaobei area [J]. Periodical of ocean University of China (Natural Science Edition), 2014, 44 (5): 79-88.
- [11] 程成,李双应,赵万为,等.安徽宿松坐山中二叠统栖霞组碳酸盐岩微相和黏土矿物特征及其对沉积相和古气候的指示[J].地质学报,2016,90(6):1208-1219.
- CHENG C, LI S Y, ZHAO W W, et al. The Characteristics of microfacies and clay minerals of the Chihhsia Formation carbonate rocks of Middle Permian in Susong, Anhui[J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90 (6): 1208-1219.
- [12] 加娜提古丽·吾斯曼,周瑶琪,姚旭,等.安徽省巢湖地区二叠纪栖霞组、孤峰组硅质岩地球化学特征对比及大地构造背景分析[J].现代地质,2017,31(4):734-745.
- GANATIGULI W, ZHOU Y Q, YAO X, et al. Geochemical Characteristics Comparison and Tectonic Background Analysis of Siliceous Rocks from Qixia Formation and Gufeng Formation of Permian in Chaohu Area, Anhui Province[J]. Geoscience, 2017, 31 (4): 734-745.
- [13] 刘喜停,颜佳新,薛武强,等.华南中二叠统栖霞组海相烃源岩形成的地球生物学过程[J].中国科学:地球科学,2014,44(6):1185-1192.
- LIU X T, YAN J X, XUE W Q, et al. The geobiological formation process of the marine source rocks in the Middle Permian Chihhsia Formation of South China[J]. Science China: Earth Sciences, 2014, 44 (6): 1185-1192.
- [14] 张银国,陈清华,陈建文,等.下扬子海相中—古生界烃源岩发育的控制因素[J].海洋地质前沿,2016,32(1):8-12.
- ZHANG Y G, CHEN Q H, CHEN J W, et al. Controlling factors on the Mesozoic Paleozoic marine source rocks in the lower Yangtze Platform [J]. Marine Geology Frontiers, 2016, 32(1): 8-12.
- [15] 何海清.浙江省栖霞组沉积微相、韵律、沉积旋回及层序地层学分析[J].石油实验地质,1997(2):127-132.
- HE H Q. Depositional Microfacies, Rhythms, cycle and sequence stratigraphy of Qixia Formation in Zhejiang Province, China[J]. Experimental Petroleum Geology, 1997(2): 127-132.
- [16] 胡筌,谭秀成,罗冰,等.四川盆地西北部二叠系栖霞阶层序地层特征及地质意义[J].古地理学报,2020,22(6):1109-1126.
- HU S, TAN X C, LUO B, et al. Sequence stratigraphic characteristics and geological significance of the Permian Qixia Stage in northwestern Sichuan Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2020, 22 (6): 1109-1126.
- [17] 魏国齐,杨威,万怡平,等.扬子地块西北缘二叠系—中三叠统层序地层与沉积相展布[J].岩石学报,2011,27(3):741-748.
- WEI G Q, YANG W, WAN Y P, et al. Stratigraphic sequence and sedimentary facies distribution of the Permian-Middle Triassic in the northwestern margin of the Yangtze block[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27 (3): 741-748.
- [18] 孟庆芬,邓军.贵州南部二叠系层序地层格架[J].现代地质,2003(1):68-74.
- MENG Q F, DENG J. The Permian sequence stratigraphic framework in Southern Guizhou[J]. Geoscience, 2003(1): 68-74.
- [19] 梅冥相,郑宽兵,初汉民,等.滇黔桂盆地及邻区二叠纪层序地层格架及古地理演化[J].古地理学报,2004(4):401-418.
- MEI M X, ZHENG K B, CHU H M, et al. Sequence stratigraphic framework and palaeogeographical evolution of the Permian of Dian-Qian-GuiBasin and its adjacent areas[J]. Journal of Palaeogeography, 2004(4): 401-418.
- [20] 梅冥相,马永生,邓军,等.滇黔桂盆地及其邻区石炭纪至二叠纪层序地层格架及三级海平面变化的全球对比[J].中国地质,2005(1):13-24.
- MEI M X, Ma Y S, DENG J, et al. Carboniferous to Permian sequence stratigraphic framework of the Yunnan-Guizhou-Guangxi basin and its adjacent areas and Global correlation of third-order sea-level changes[J]. Geology in China, 2005(1): 13-24.
- [21] 白晓亮,郗诚,和源,等.四川盆地中二叠统栖霞组层序地层特征及沉积演化模式[J].东北石油大学学报,2020,44(6):33-42.
- BAI X L, XI C, HE Y, et al. Sequence stratigraphic characteristics and sedimentary evolution model of Middle Permian Qixia Formation in the Sichuan Basin[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2020, 44 (6): 33-42.
- [22] 覃建雄,曾允孚,陈洪德,等.西南地区二叠纪层序地层及海平面变化[J].岩相古地理,1998,18(1):19-35.
- QIN J X, ZENG Y F, CHEN H D, et al. Permian sequence stratigraphy and sea-level changes in Southwest China[J]. Journal of Palaeogeography, 1998, 18 (1):

- 19-35.
- [23] 李祥辉,王成善,陈洪德,等.中国南方二叠纪层序地层时空格架及充填特征[J].沉积学报,1999(4):25-31.
LI X H, WANG C S, CHEN H D, et al. Patterns and Fills of Permian Sequence Stratigraphy in South China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1999 (4): 25-31.
- [24] 杜小弟,黄志诚,陈智娜,等.下扬子区二叠系层序地层格架[J].地层学杂志,1999(2):74-82.
DU X D, HUANG Z C, CHEN Z N, et al. Division and Correlation of the Permian Sequence in Lower Yangtze Region[J]. Journal of Stratigraphy, 1999(2): 74-82.
- [25] 张克信,刘金华,何卫红,等.中下扬子区二叠系露头层序地层研究[J].地球科学,2002(4):357-365.
ZHANG K X, LIU J H, HE W H, et al. Research on Outcrop Sequence Stratigraphy of Permian in the Middle-Lower Yangtze Region[J]. Earth Science, 2002 (4): 357-365.
- [26] 周雁,陈洪德,王成善,等.中扬子区中二叠统层序地层研究[J].地层学杂志,2005(3):270-274.
ZHOU Y, CHEN H D, WANG C S, et al. The Middle Permian Sequence stratigraphy of the mid-Yangtze area[J]. Journal of stratigraphy, 2005 (03): 270-274.
- [27] 丁枫,陈洪德,侯德才,等.黔南拗陷二叠系层序地层特征及岩相古地理[J].成都理工大学学报(自然科学版),2012,39(1):76-82.
DING F, CHEN H D, HOU M C, et al. Characteristics of the Permian Sequence stratigraphy and the palaeogeographic environment in South Guizhou sag, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Natural Science Edition), 2012, 39(1): 76-82.
- [28] 田望学,张汉金,李雄伟,等.鄂西南二叠系层序地层与盆地演化[J].资源环境与工程,2007(2):95-100.
TIAN W X, ZHANG H J, LI X W, et al. The Permian Sequence Stratigraphy and Basin Evolution in Southwest of Hubei[J]. Resources Environment and Engineering, 2007(2): 95-100.
- [29] 王鸿祯,史晓颖.沉积层序及海平面旋回的分类级别——旋回周期的成因讨论[J].现代地质,1998,12(1):1-16.
WANG H Z, SHI X Y. Hierarchy of Depositional sequence and eustatic cycles;a Discussion on the mechanism of Sedimentary sequence[J].Geoscience, 1998, 12 (1): 1-16.
- [30] 王训练.露头层序地层学研究的几个基本理论问题[J].中国科学(D辑),1999,29(1):2-30.
WANG X L. Several basic theoretical problems of outcrop sequence stratigraphy[J]. Science in China(Series D), 1999,29(1): 2-30.
- [31] 刘峰,蔡进功,吕炳全,等.巢湖地区栖霞组碳酸盐烃源岩的形成及影响因素[J].中国科学:地球科学,2011,41(6):873-886.
LIU F, CAI J G, LU B Q, et al. Formation and influencing factors of carbonate source rock of the Lower Permian Chihsia Formation in Chaohu region, Anhui Province[J]. Science China: Earth Sciences, 2011, 41 (6): 873-886.
- [32] 韦恒叶,陈代钊,遇昊,等.鄂西地区中二叠统栖霞组下部烃源岩形成机理[J].地质科学,2011,46(1):68-82.
WEI H Y, CHEN D Z, YU H, et al. Formation mechanism of source rocks in the lower Chihhsian Formation of Middle Permian, western Hubei Province [J]. Chinese Journal of Geology, 2011, 46(1): 68-82.
- [33] 石刚,黄正清,郑红军,等.下扬子地区二叠系“三气一油”钻探发现[J].中国地质,2018,45(2):416-417.
SHI G, HUANG Z Q, ZHENG H J, et al. Drilling discovery of “Three Gas One Oil” in the Permian strata of Lower Yangtze area[J]. Geology in China, 2018, 45(2): 416-417.
- [34] 郑红军,周道容,殷启春,等.下扬子页岩气地质调查新进展及突破难点思考[J].地质力学学报,2020,26(6):852-871.
ZHENG H J, ZHOU D R, YIN Q C, et al. New progress and breakthrough difficulties on shale gas geological survey in the lower Yangtze area[J]. Journal of Geomechanics, 2020, 26(6): 852-871.
- [35] 徐锦龙,张晋喆,沈仕豪,等.安徽泾县蔡村晚二叠世龙潭组与大隆组界线发现蚀变黏土岩[J].中国地质,2019,46(4):937-938.
XU J L, ZHANG J Z, SHEN S H, et al. The discovery of altered volcanic clayrock in Late Permian strata between Longtan Formation and Dalong Formation of Jingxian area, Anhui Province[J]. Geology in China, 2019,46(4): 937-938.
- [36] 董敏,王宗秀,董会,等.皖南地区二叠系孤峰组页岩中高密度含甲烷包裹体特征及其地质意义[J].地质力学学报,2020,26(6):872-880.
DONG M, WANG Z X, DONG H, et al. The characteristics and geological significance of highdensity methane-bearing inclusions in the Permian Gufeng Formation shale, southern Anhui[J]. Journal of Geomechanics, 2020, 26(6): 872-880.

- [37] 赵牧华, 石刚, 武磊彬. 安徽皖江地区页岩气地质调查地震勘探数据采集技术研究[J]. 华东地质, 2017, 38(3): 203-209.
- ZHAO M H, SHI G, WU L B. Acquisition technology study of shale gas seismic prospecting data geological in Wangjiang region, Anhui Province[J]. East China Geology, 2017, 38(3): 203-209.
- [38] 吴俊, 徐锦龙. 江南断裂带周边地区志留系层序地层特征及页岩气勘探前景[J]. 华东地质, 2020, 41(2): 184-194.
- WU J, XU J L. Characteristics of Silurian sequence stratigraphic around the Jiangnan fault zone and analysis of shale gas potential[J]. East China Geology, 2020, 41(2): 184-194.
- [39] 王佳龙, 张宝松, 陈基伟, 等. 大地电磁测深不同反演方法的应用效果对比——以安徽皖江地区页岩气调查为例[J]. 华东地质, 2020, 41(1): 79-87.
- WANG J L, ZHANG B S, CHEN J W, et al. Comparison of application effects of magnetotelluric sounding using different inversion methods in shale gas investigation in Wangjiang area of Anhui Province[J]. East China Geology, 2020, 41(1): 79-87.
- [40] 颜佳新. 华南地区二叠纪栖霞组碳酸盐岩成因研究及其地质意义[J]. 沉积学报, 2004(4): 579-587.
- YAN J X. Origin of Permian Chihshian Carbonates from South China and Its Geological Implications[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004(4): 579-587.
- [41] 章森桂, 张允白, 严惠君. 《中国地层表》(2014) 正式使用[J]. 地层学杂志, 2015, 39(4): 359-366.
- ZHANG S G, ZHANG Y B, YAN H J. Introduction to the Stratigraphic chart of China(2014)[J]. Journal of Stratigraphy, 2015, 39(4): 359-366.
- [42] VAIL P R, MITCHUM R M J, THOMPSON S. III Seismic stratigraphy and global changes of sea level[M]. Global cycles of relative changes of sea level (part four). AAPG, 1977: 83-98.
- [43] VAIL P R. Seismic stratigraphy interpretation using sequence stratigraphy, part I: Seismic stratigraphy interpretation procedure[M]. Atlas of seismic stratigraphy, studies in Geology, 1987: 1-10.
- [44] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 19145—2003 沉积岩中总有机碳的测定[S]. 2003: 1-3.
- General Administration of quality supervision, inspection and Quarantine of the people's Republic of China. GB/T 19145—2003 Determination of total organic carbon in sedimentary rocks[S]. 2003: 1-3.
- [45] 蒲泊伶, 包书景, 王毅, 等. 页岩气成藏条件分析——以美国页岩气盆地为例[J]. 石油地质与工程, 2008(3): 33-36.
- PU B L, BAO S J, WANG Y, et al. Analysis of shale gas accumulation conditions: a case study of shale gas basins in the United States[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2008(3): 33-36.
- [46] 蒋裕强, 董大忠, 漆麟, 等. 页岩气储层的基本特征及其评价[J]. 天然气工业, 2010, 30(10): 7-12.
- JIANG Y Q, DONG D Z, QI L, et al. Basic features and evaluation of shale gas reservoirs [J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(10): 7-12.
- [47] 帅琴, 黄瑞成, 高强, 等. 页岩气实验测试技术现状与研究进展[J]. 岩矿测试, 2012, 31(6): 931-938.
- SHUAI Q, HUANG R C, GAO Q, et al. Research Development of Analytical Techniques for Shale Gas [J]. Rock and Mineral Analysis, 2012, 31(6): 931-938.
- [48] 成海燕. 北黄海及其周边盆地烃源岩评价研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009: 1-158.
- CHENG H Y. The Evaluation study of source rock in the North Yellow Sea and peripheral basins[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009: 1-158.
- [49] MILICI R C, SWEZEY C R. Assessment of Appalachian Basin Oil and Gas Resources: Devonian Shale Middle and Upper Paleozoic Total Petroleum System [M]. USGS, 2006.
- [50] 沈忠民, 魏金花, 朱宏权, 等. 川西坳陷煤系烃源岩成熟度特征及成熟度指标对比研究[J]. 矿物岩石, 2009, 29(4): 83-88.
- SHEN Z M, WEI J H, ZHU H Q, et al. Comparative research on maturity feature and maturity indexes of coal source rocks from West Sichuan Basin depression[J]. J. mineral petrol, 2009, 29(4): 83-88.
- [51] 聂海宽, 张金川. 页岩气聚集条件及含气量计算——以四川盆地及其西南缘下古生界为例[J]. 地质学报, 2012, 86(2): 349-361.
- NIE H K, ZHANG J C. Shale gas accumulation conditions and gas content calculation: a case study of Sichuan Basin and its Periphery in Lower Paleozoic[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(2): 349-361.
- [52] Curtis J B. Fractured Shale-Gas Systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1921-1938.
- [53] 中华人民共和国自然资源部. 页岩气资源调查评价技术要求[D]. 2009: 1-36.
- Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. Technical requirements for shale gas resources investigation and evaluation[D]. 2009: 1-36.

Sequence stratigraphic characteristics and shale gas exploration prospect of Middle Permian Qixia Formation in the Xuancheng-Guangde Basin

PENG Xiaodong¹, XU Jinlong¹, FANG Chaogang², SHEN Shihao¹, ZHANG Chengcheng²

(1. *Geological Survey of Anhui Province, Hefei 230001, Anhui, China*;

2. *Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China*)

Abstract: Based on the method of sequence stratigraphy, the stratigraphic sequence of the Middle Permian Qixia Formation in the Xuancheng-Guangde Basin was analyzed. Combined with the organic geochemical characteristics of the organic-rich shale, the shale gas exploration prospect was evaluated. The results show that the Qixia Formation in the Xuancheng-Guangde Basin can be divided into three third-order sequences, which represent three relatively large cycles of sea-level rise and fall. Each sequence can be subdivided into the transgressive systems tract, the condensed section, and the highstand systems tract. The organic-rich shale mainly occurred in the condensed section and transitional sections between the condensed section and transgressive systems tract or highstand systems tract. The thickness of organic-rich shales in Qixia Formation varies from 8 to 35 m. The TOC value ranges from 0.77% to 9.49%, and the maturity of organic matter is about 1.428%. Brittle minerals (quartz, feldspar) of shales are relatively enriched, showing good brittleness and compressibility. Accordingly, shale gas accumulation conditions of Qixia Formation are good, especially for the top limestone section of Qixia Formation, which has great resource potential.

Key words: sequence stratigraphy; shale gas; Qixia Formation; Xuancheng-Guangde Basin of Anhui Province