

下扬子页岩气地质调查新进展及突破难点思考

郑红军¹, 周道容¹, 殷启春¹, 熊强青², 王中鹏², 方朝刚¹, 滕龙¹, 邵威¹, 王元俊¹

ZHENG Hongjun¹, ZHOU Daorong¹, YIN Qichun¹, XIONG Qiangqing², WANG Zhongpeng², FANG Chaogang¹, TENG Long¹, SHAO Wei¹, WANG Yuanjun¹

1. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016;

2. 安徽省勘查技术院, 安徽 合肥 230001

1. *Nanjing Geological Survey Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China;*

2. *Geological Exploration Technology Institute of Anhui Province, Hefei 230001, Anhui, China*

ZHENG H J, ZHOU D R, YIN Q C, et al., 2020. New progress and breakthrough difficulties on shale gas geological survey in the lower Yangtze area [J]. Journal of Geomechanics, 26 (6): 852-871. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2020.26.06.067

Abstract: Shale gas breakthroughs are in urgent need in the construction of clean energy system in the Yangtze River Economic Belt. The previous geological and geophysical data in the lower Yangtze area were fully integrated, and a 1 : 250000 shale gas geological survey was systematically carried out in the lower Yangtze area. Ten shale gas wells were drilled in the “two belts and one zone”, which includes the depression belt along the Yangtze River in the southern regions of Jiangsu and Anhui, the Jiangxi Pingle-Zhejiang Qiantang depression belt, and the southern North China zone. The geological accumulation conditions of organic-rich shales in the Permian, Silurian, Ordovician and Cambrian were basically identified. Among those formations, “three types of gas and three types of oil”, including shale gas, tight sandstone gas, coal bed gas, shale oil, fractured sandstone oil and fractured limestone oil, were discovered from nine wells. The great discoveries deepened our understanding of Permian and Silurian hydrocarbon accumulations. The hydrocarbon-bearing properties of the Triassic, Ordovician and Cambrian were explored. Meanwhile, the new zones and layers were established and the potential for hydrocarbon and shale gas exploration were revealed in the lower Yangtze and southern North China in the Meso-Palaeozoic. In the research, ten shale gas prospecting areas were delineated. The preliminary evaluation of the prospective resources of the main target layers in nine shale gas prospecting areas was completed and the problems of resource prospects were solved. At last the bottlenecks in the lower Yangtze shale gas exploration were discussed and the direction of breakthrough was put forward.

Key words: lower Yangtze area; Paleozoic; shale gas; geological survey; 3D geological modeling; prospecting area; resource potential evaluation

摘要: 围绕长江经济带清洁能源体系建设对页岩气突破的重大需求, 在充分整合长江下游地区以往地质和物探资料的基础上, 系统开展了 1 : 25 万页岩气基础地质调查, 在苏皖南沿江拗陷带、江西萍乐-浙江钱塘拗陷带、南华北地区“两带一区”实施了 10 口页岩气调查井, 基本查明了主要工作区古生界二叠系、志留系、奥陶系、寒武系富有机质泥页岩成藏地质条件, 有 9 口井分别在三叠、二叠、志留、寒武系

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20160180, DD20190083, DD20190281)

第一作者简介: 郑红军 (1975-), 男, 高级工程师, 从事页岩气地质调查、三维地质建模等研究工作。E-mail: 252300878@qq.com

通讯作者: 周道容 (1983-), 男, 硕士, 助理研究员, 页岩油气地质调查。E-mail: zdr650@163.com

收稿日期: 2020-08-25; **修回日期:** 2020-10-20; **责任编辑:** 范二平

引用格式: 郑红军, 周道容, 殷启春, 等, 2020. 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, 26 (6): 852-871. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2020.26.06.067

4套层系获得页岩气、致密砂岩气、煤层气、页岩油、裂缝性砂岩油、裂缝性灰岩油“三气三油”的重要新发现,深化了二叠系和志留系成藏地质认识,探索了三叠系、奥陶系和寒武系含油气性,开辟了新区新层系,揭示了下扬子及南华北中—古生界油气页岩气资源勘查潜力。圈定了10个远景区,初步评价了9个远景区主要目标层的远景资源量,解决了资源前景问题;讨论了制约下扬子页岩气调查突破的卡脖子问题,提出了下一步突破的方向。

关键词: 下扬子地区; 古生界; 页岩气; 地质调查; 三维地质建模; 远景区; 资源潜力评价

中图分类号: P553 **文献标识码:** A

0 引言

长江经济带对页岩气等清洁能源需求巨大而迫切。中国南方复杂构造区页岩气经过多年的公益性地质调查与持续的商业勘探开发,俨然已形成基础地质调查引领、战略选区调查突破、社会商业勘查跟进的良好态势。上、中扬子地区已陆续实现多个地区多套层系油气页岩气的重大突破,并相继实现试采和商业性开采。贵州正安县安页1井2016年在二叠系栖霞组、志留系石牛栏组、五峰—龙马溪组、奥陶系宝塔组4套层系获得油气页岩气重大突破后,顺利实现了油气页岩气区块公开拍卖,有效探索了探矿权管理体制变革,成为继中国石油长宁威远、中国石化重庆涪陵页岩气商业开发之后的清洁能源重要接替领域;湖北宜昌鄂宜页1HF、鄂阳页1HF、鄂宜页2HF水平井等相继实现了震旦系、寒武系、志留系页岩气地质调查的重大突破,湘中新化地区湘新地1井、湘新地3井获泥盆系页岩气重要发现,湘中涟源凹陷车田江向斜获得石炭系“三气”重要发现。上、中扬子地区从震旦系到古生界寒武系、奥陶系、志留系、到泥盆系、石炭系、二叠系地层均取得了重大突破或重要发现(解习农等,2017;翟刚毅等,2017;姜振学等,2020)。上述页岩气发现和突破的过程体现了“二元富集”(郭旭升,2014)理论与实践的相互印证过程。

随着上中游相继实现了页岩气的战略突破,长江经济带页岩气清洁能源部署由上中游向下游的战略转移态势已然形成。作为大地构造单元的下扬子地区与地理区划上的长江下游地区基本对应,主要包括苏、皖、浙、赣、沪四省一市,是长江经济带与“一带一路”的交汇地带,拥有世界级城市群——长江三角洲城市群,是国内经济最具活力、开放程度最高、创新能力最强、吸纳外来人口最多的

国家经济龙头地区,也是世界上经济增长最迅速、城市化进程最快的地区之一。人口高度密集、经济高度发达的长江下游地区对页岩气等清洁能源高度依赖和需求,在这种背景下,下扬子地区的中央财政公益性页岩气基础地质调查获得了一系列重要新发现,引领和带动了地方政府和社会企业积极投入,加快了下扬子页岩气实现战略突破的进程(方朝刚等,2018,2019;郑红军,2018;滕龙等,2019;王修齐等,2019;郑红军等,2020),本文在梳理下扬子陆块特殊的地质特点和复杂性的基础上,对制约下扬子页岩气突破的关键地质问题和技术难点进行了研究及探讨。

1 下扬子页岩气地质调查取得重要新发现

1.1 “一区两带”页岩气地质调查取得“三气三油”的重要发现

下扬子地区与中上扬子同属于扬子陆块,为扬子陆块东段,其北西以著名的北北东向一级断裂带郟庐断裂带为界而与华北陆块南缘毗邻,南东以江绍拼合带为界与华夏陆块相连,形成由郟庐断裂带和萍绍断裂带所夹持、并向北东方向发散状敞口展布、与南黄海盆地连为一体的三角形地区,内部由北至南被滁河断裂、天目山—白际山断裂分为三个构造区带,分别为北带的苏北盆地、中带的苏皖赣沿江拗陷带、南带的江西萍乐—浙江钱塘拗陷带(图1、图2),与南华北区并称长江下游的“三带一区”(图1;郑红军等,2020)。发育多期次纵向叠置、横向复合的大型推覆滑脱构造,与中上扬子具有相似的地质构造演化史和区域可对比的沉积层序,具备油气页岩气生成转化的物质基础(邹才能,2010,2015,2016;潘继平等,2011;张敏强和陆永潮,2013;郭旭升等,2014;董大忠等,2016;马永生等,2018)。

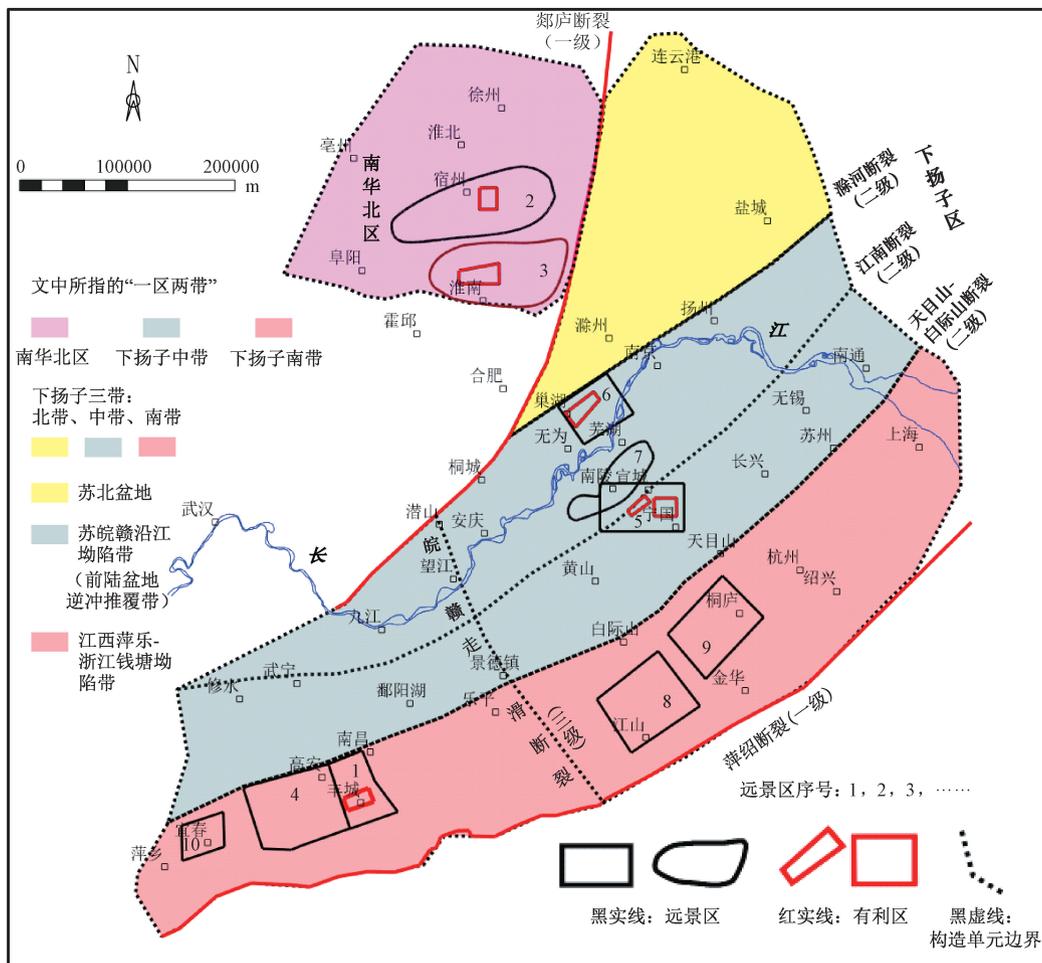


图1 下扬子“三带”构造区划及研究区“两带一区”、10个远景区、6个有利区分布

Fig.1 Distribution of six favorable areas, ten prospecting areas and the “two belts and one zone” in the research area and the structural division of the “three belts” of the lower Yangtze and the southern North China zone

中央财政二级项目“下扬子地区古生界页岩气基础地质调查”2016—2018年期间调查评价了长江下游皖江拗陷带、江西萍乐—浙江钱塘拗陷带、南华北区“一区两带”(图1、图2),圈定了10个远景区,有9口井4套层系获得“三气三油”调查的重要新发现,对其中的9个远景区主要目标层的资源量进行了初步估算。开辟了新区新层系,揭示了下扬子及南华北中—古生界油气页岩气资源勘查潜力(图1、图2)。

1.1.1 皖南沿江拗陷带二叠系、志留系的“三气二油”新发现

(1) 安徽宣城远景区二叠系“三气一油”及三叠系灰岩裂缝油的新发现。继2016年在皖江拗陷带的安徽宣城远景区水东复向斜有利区港地1井(GANGD1)在二叠系大隆组泥页岩、龙潭组致密砂岩、孤峰组硅质页岩取得页岩气、致密砂岩气、煤层气、页岩油的“三气一油”重要发现之后,在

水东复向斜黄渡次洼部署实施的皖宣地1井(WXD1)在三叠系和龙山组泥质条带状灰岩高角度裂缝储层中发现气测全峰峰值30.827%的轻质油油迹—油斑显示,圈定了宣城远景区3809 km²、优选了水东复向斜382 km²的页岩油气有利区的勘查面积,如图1、图3、图4所示(文中所有目的层埋深构造图利用三维构造地质建模技术进行井震地质一体化成图,技术方法详见参考文献郑红军等,2010,2011,2020;科瓦列夫斯基,2014),初步查明了港地1井(GANGD1)和皖宣地1井(WXD1)所在的水东复向斜为该区二叠系良好的气液混合相态供烃凹陷,港地1井和皖宣地1井“三气二油”的发现既揭示了水东复向斜二叠系页岩油气的资源勘查潜力,也揭示了三叠系源外储层如遇局部稳定构造单元可形成构造圈闭和岩性圈闭油气藏的资源勘查潜力。

(2) 安徽南陵远景区志留系页岩气的新发现。皖南地1井(WND1)在下志留统高家边组笔石页

序 号	潜力区带或构造带		面积 /km ²	拗拉槽盆地 (南华纪陆缘拗陷槽、陆内裂陷槽 → 中生代裂陷槽) 构造控盆 (凹陷) → 盆地 (凹陷) 控相 → 相控成藏				多凹陷断面积 /km ²	下扬子陆块面积 /km ²	备注	
	下扬子“三带” (南华北区和下扬子两带)	长江下游“一区两带” (南华北区和下扬子两带)		构造控盆		构造控凹					盆地 (凹陷) 控相相控成藏多凹陷控相成藏目的层
				陆缘拗陷槽	面积 /km ²	陆内改造的多凹陷	面积 /km ²				
1	北带: 苏北盆地	—	55000	苏北拗陷槽	55000	多期多类箕状断陷	55000	55000	老区		
2	中带: 苏皖南沿江拗陷带 (前陆盆地逆冲推覆带)	以长江为中心线呈南北对称带状分布	140000	苏皖南沿江拗陷槽	100000	皖南沿江拗陷区	皖南	中上二叠统大隆、龙潭、孤峰组	21200	项目调查评价的潜力区带	
				苏皖南沿江拗陷槽	—	无为拗陷	—	中上二叠统大隆、龙潭、孤峰组			
				苏皖南沿江拗陷槽	—	南陵拗陷	3200	中上二叠统大隆、龙潭、孤峰组			
				苏皖南沿江拗陷槽	—	望江拗陷	9200	中上二叠统大隆、龙潭、孤峰组			
3	南带: 江西萍乐—浙江钱塘塘拗陷带	—	119000	赣西北沿江拗陷槽	40000	赣西北沿江拗陷区	赣西北	寒武系、志留系、奥陶系	314000	项目调查评价的潜力区带	
				萍乐拗陷槽	49000	萍乐拗陷	萍乐拗陷	寒武系、志留系、奥陶系			
				钱塘拗陷槽	70000	钱塘拗陷	钱塘拗陷	中上二叠统乐平组、茅口组、小江边组; 宜春乐平组相变为七宝山型			
				钱塘拗陷槽	—	复向斜	—	寒武系、志留系、奥陶系			
4	—	—	88000	两淮拗陷槽	58000	两淮台拗	两淮盆地 (裂陷槽)	寒武系、志留系、奥陶系	88000	项目调查评价的潜力区带	
				合肥拗陷槽	30000	合肥拗陷	合肥盆地 (裂陷槽)	寒武系、志留系、奥陶系			
				—	—	—	—	—			
				—	—	—	—	—			

图2 下扬子与南华北区构造控盆 (拗、凹)、盆地 (拗或凹陷) 控相、相控成藏的关系图版

Fig.2 Relationship of tectonics-controlled basin (depression, sag), basin-controlled (depression or sag) facies and facies-controlled reservoir formation in the lower Yangtze area and the southern North China zone

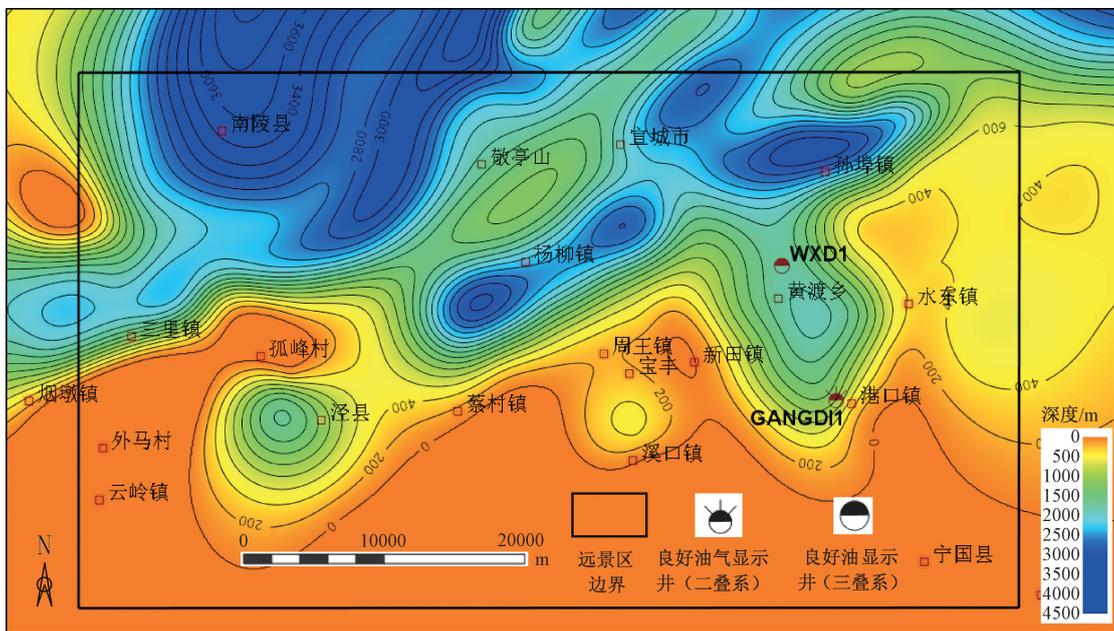


图3 安徽宣城远景区二叠系大隆组底界埋深构造图

Fig.3 Structural map of the bottom boundary burial depth of the Permian Dalong group in the Xuancheng prospecting area, Anhui Province

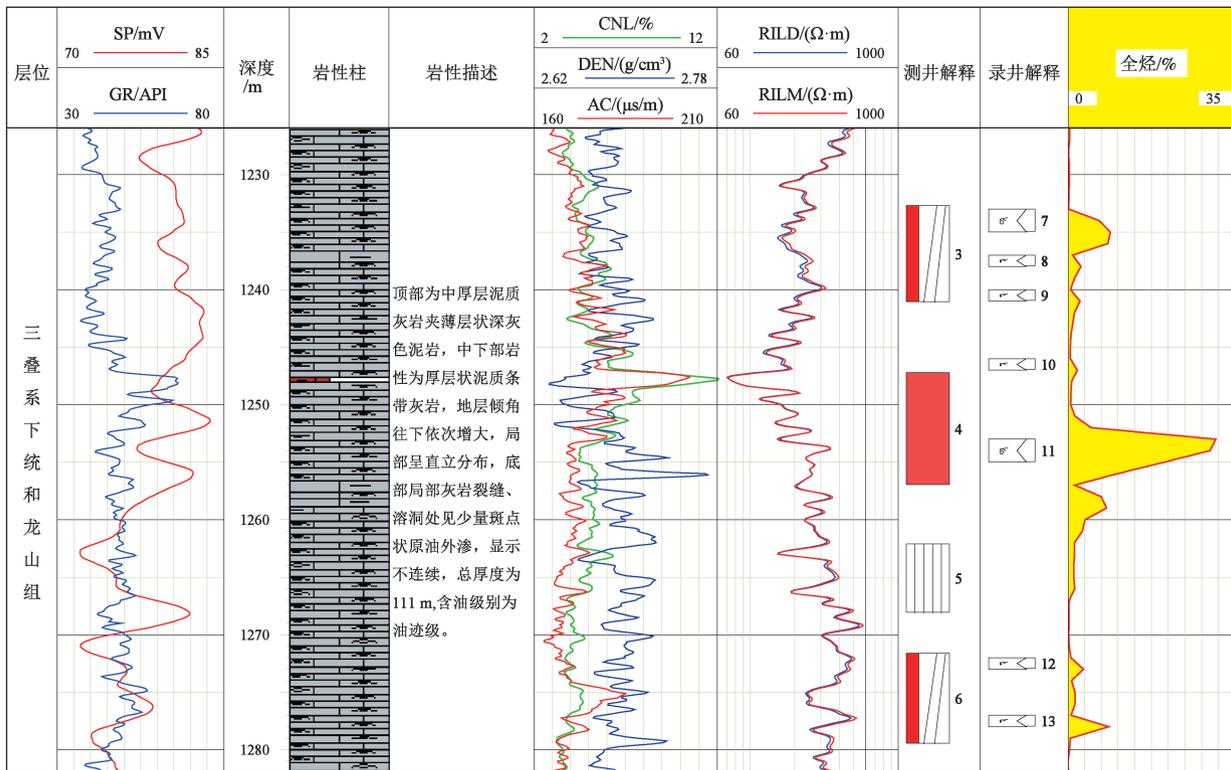


图4 皖宣地1井(WXD1)地层与测录井综合柱状图(1:200)

Fig.4 Comprehensive histogram of stratigraphic units and logging of the Well WXD1 (1:200)

岩中发现了气测异常4.48%的后效显示，圈定了南陵凹陷远景区2936 km²的页岩气勘查面积；安徽巢湖-含山远景区皖含地1井(WXD1)在高家边组笔石页岩

岩中发现了0.83%的气测显示，圈定了巢湖-含山远景区3339 km²、优选了巢湖-含山复向斜有利区454 km²的页岩气勘查面积。如图1、图5、图6所示。

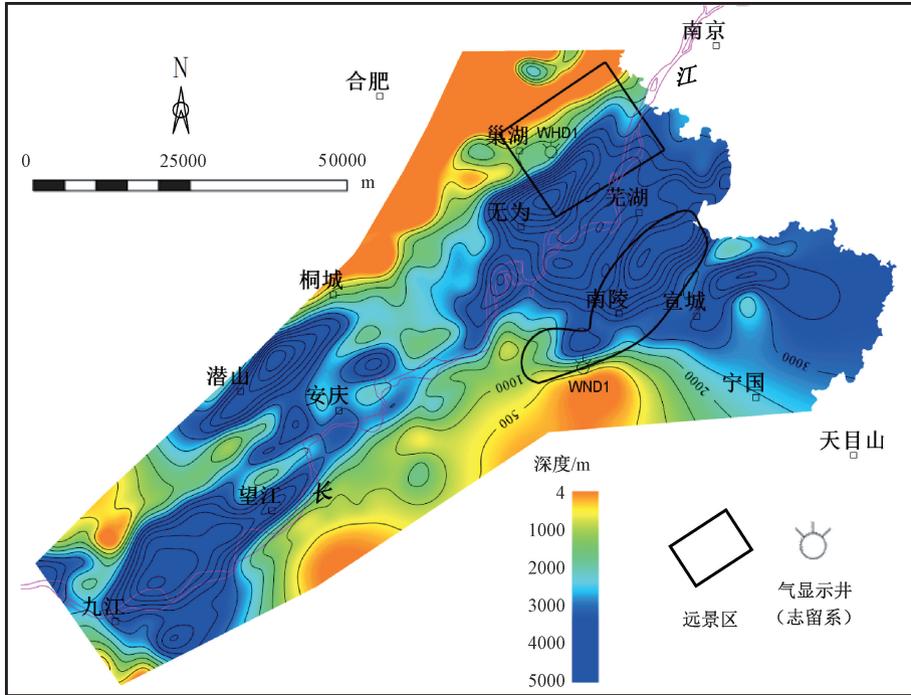


图 5 皖江拗陷区下志留统高家边组底界埋深构造图及皖南地 1 井 (WND1) 和皖舍地 1 井 (WHD1) 位置分布

Fig. 5 Structural map of the bottom boundary burial depth of the Lower Silurian Gaojiabian group in the depression zone along the Yangtze River in Anhui, and positions of the Wells WND1 and WHD1

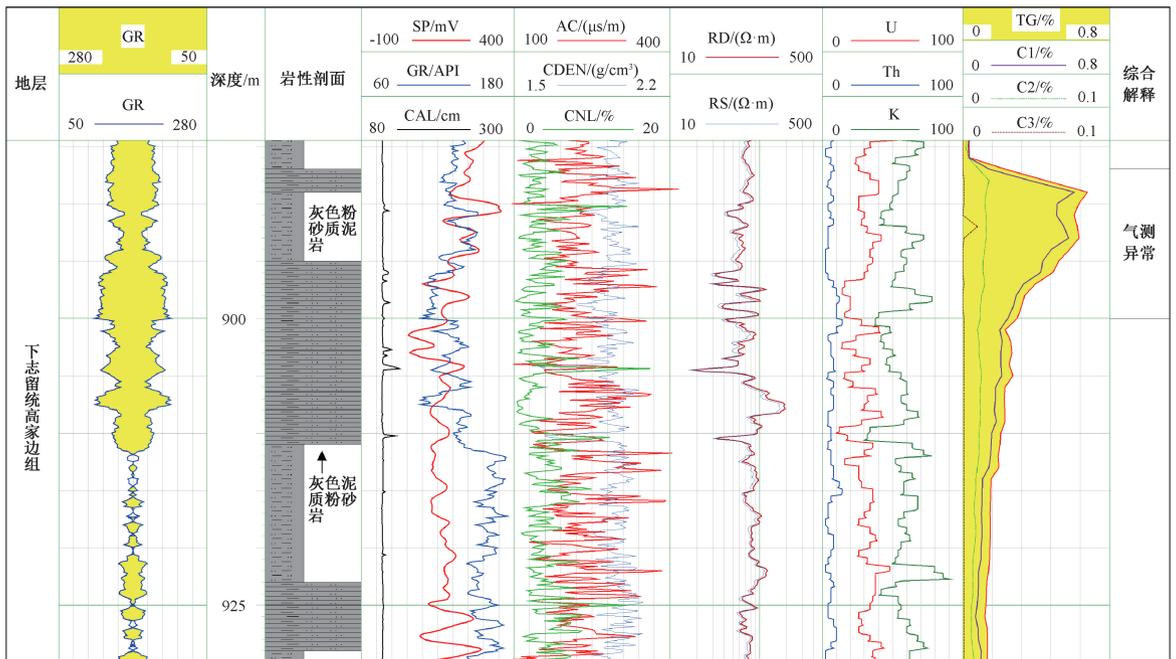


图 6 皖南地 1 井 (WND1) 地层与测录井综合柱状图 (1:200)

Fig. 6 Comprehensive histogram of stratigraphic units and logging of the Well WND1 (1:200)

皖江拗陷潜力带页岩油气的发现可形成该区带内二叠系、志留系累计 10084 km² 的勘查面积, 揭示了皖江拗陷潜力带良好的资源勘查前景。

1.1.2 安徽南华北区获得“三气一油”的重要新发现

安徽南华北区淮南远景区皖潘地 1 井 (WYD1)、

宿州远景区皖埃地1井(WYD1)在古生界二叠系上、下石盒子组、山西组、太原组泥页岩储层、致密砂岩储层及煤层中获得气测异常全烃峰值6%~49%的“三气一油”重要新发现。皖潘地1井(WPD1)下石盒子组泥页岩现场解吸气含量高达 $3.46 \text{ m}^3/\text{t}$,解吸气量大于 $0.5 \text{ m}^3/\text{t}$ 的泥页岩累计厚度为81.01 m;煤层气解吸气含量高达 $7.34 \text{ m}^3/\text{t}$,其含气量大于 $1 \text{ m}^3/\text{t}$ 的煤层累计厚度为31.58 m;砂岩解吸气含量为 $0.34 \text{ m}^3/\text{t}$ (未计逸散的游离气量),上石盒子组和下

石盒子组致密细砂岩裂缝发现油斑显示,有油脂感,岩心湿照呈暗黄色,含油岩心占岩心的10%,占同类岩心的15%~20%,滴照呈乳白色扩散,浸泡液暗棕色,荧光下呈乳白色,24小时后岩心荧光干照呈暗黄色。圈定了淮南潘集和宿州埃桥2个远景区共计 14584 km^2 ,优选了潘集耿村复向斜和埃桥向斜2个有利区共计 989 km^2 的页岩气资源勘查面积。揭示了华北陆块在皖北地区良好的页岩油气勘查前景,如图1、图7、图8所示。

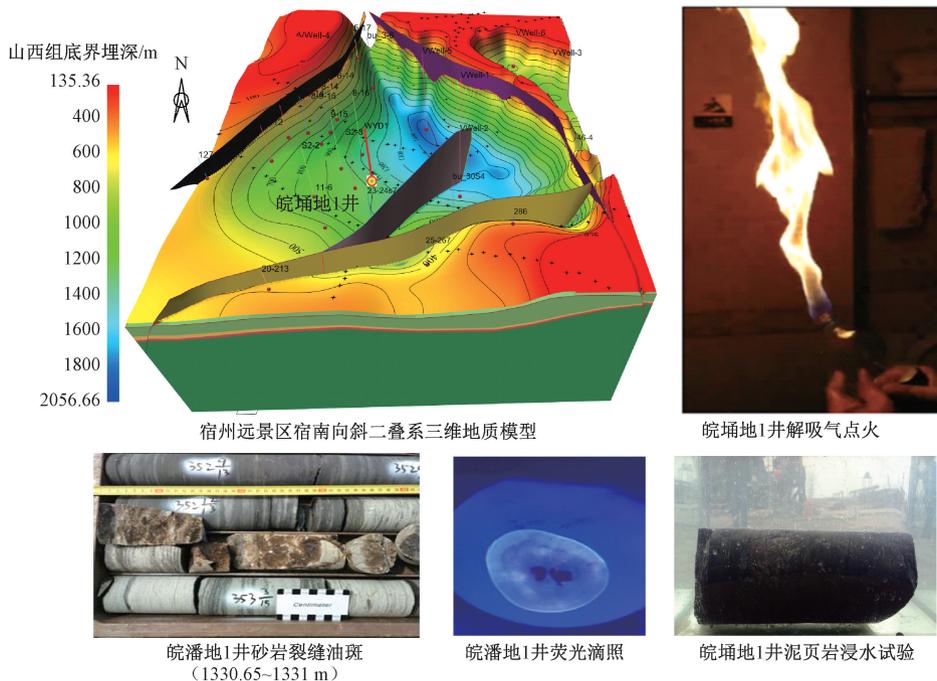


图7 宿州远景区宿南向斜有利区三维地质模型、皖埃地1井(WYD1)、皖潘地1井(WPD1)录井显示特征
Fig.7 3D geological model of the Suzhou prospecting area and the logging characteristics of the Wells WYD1 and WPD1

1.1.3 江西萍乐-浙江钱塘拗陷带古生界二叠系、奥陶系、寒武系的“三气”特征

(1) 江西萍乐拗陷丰城远景区赣丰地1井(GFD1)、赣高地1井(GGD1)在古生界二叠系乐平组、茅口组富有机质泥页岩、致密砂岩、煤层中获得气测异常全烃峰值7.8%~19.56%的“三气”重要发现。赣丰地1井乐平组王潘里段泥页岩解吸气含量高达 $1.5 \text{ m}^3/\text{t}$,煤层解吸气含量高达 $10 \text{ m}^3/\text{t}$,砂岩解吸含气量为 $0.3 \text{ m}^3/\text{t}$ (未计逸散的游离气量)。赣高地1和赣丰地1井的含气发现揭示了萍乐拗陷中部丰城-高安古斜坡构造带二叠系具备“三气”连续型聚集成藏的地质条件和连片勘探的资源潜力(丰城-高安远景区连片面积为 8548 km^2)。如图1、图9、图10所示。

(2) 浙西钱塘拗陷带江山远景区浙江地1井

在中寒武统杨柳岗组深灰色泥质条带状灰岩夹薄层黑色泥岩层段发现气测异常显示,测录井解释认为具备下生上储、古生新储型成藏组合的条件,揭示了浙西寒武系荷塘组富有机质泥页岩具极好的生烃能力和供烃能力,且和上覆的杨柳岗组裂缝性灰岩构成了良好的生储盖组合,如能找到构造圈闭或岩性圈闭条件较好的部位,有望针对江山-桐庐-宁国远景区形成 22080 km^2 的连片规模化勘查局面。

(3) 浙西钱塘拗陷带桐庐远景区东辉向斜核部(桐庐县东辉乡西侧)探索奥陶系胡乐组、宁国组硅质页岩而部署实施的浙桐地1井钻遇目的层奥陶系胡乐组和宁国组硅质页岩,见微弱气测异常显示,揭示了宁国梅林向斜胡乐组和宁国组与桐庐胡乐组和宁国组同为环带状优势相带,有望

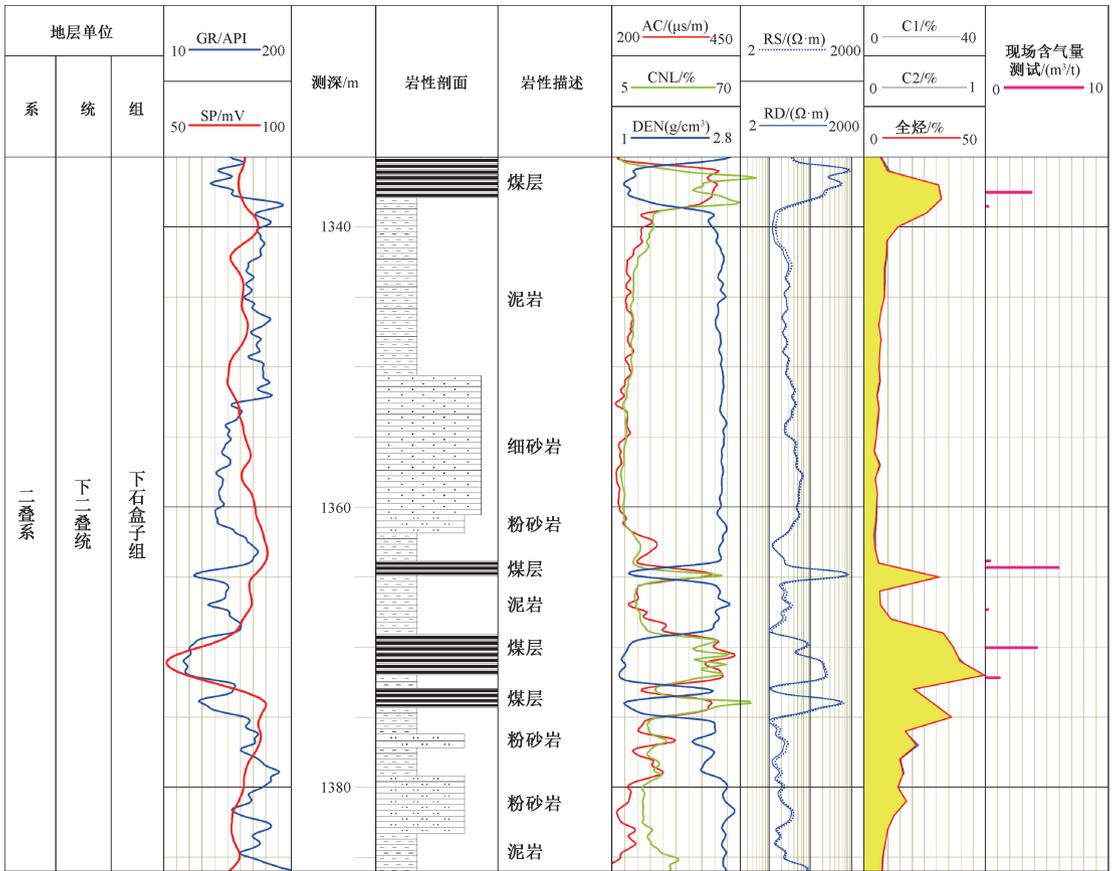


图 8 皖潘地 1 井 (WPD1) 地层与测录井综合柱状图 (1 : 200)
 Fig. 8 Comprehensive histogram of stratigraphic units and logging of the Well WPD1 (1 : 200)

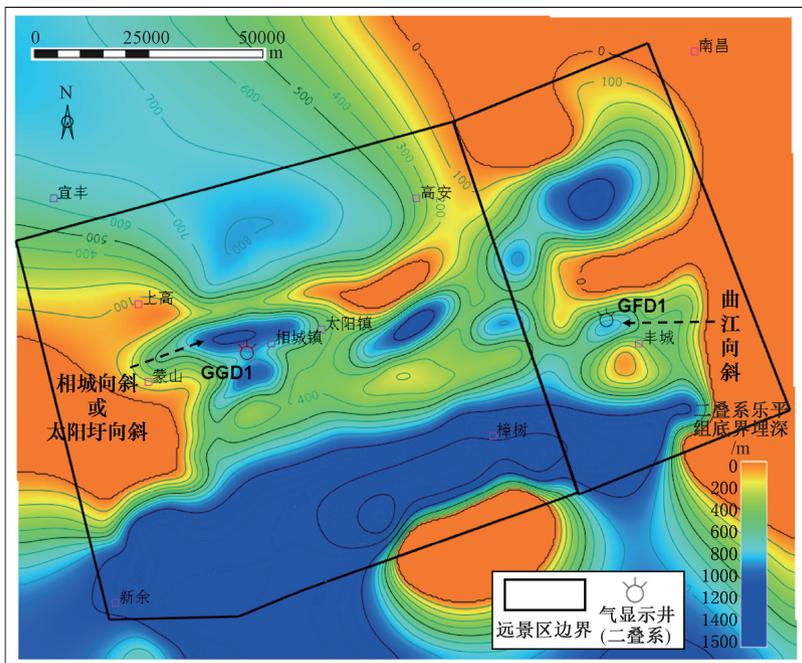


图 9 江西萍乐拗陷丰城—高安远景区二叠系乐平组底界埋深构造图 (丰城远景区曲江向斜有利区赣丰地 1 井 GFD1、高安远景区相城向斜有利区赣高地 1 井 GGD1)
 Fig. 9 Structural map of the bottom boundary burial depth of the Permian Leping group in the Fengcheng-Gaoan prospecting area, Jiangxi Province (The Well GFD1 in the syncline-favorable area in Qujiang, Fengcheng prospecting area; The Well GGD1 in the syncline-favorable area in Xiangcheng, Gaoan prospecting area)

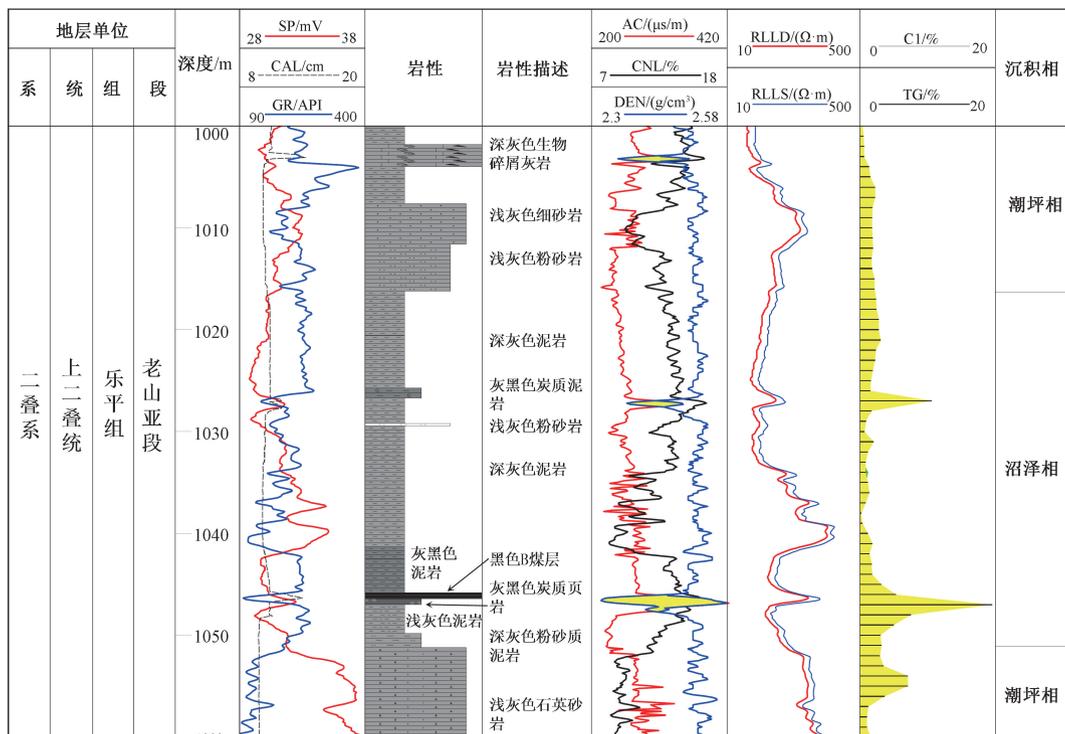


图 10 赣丰地 1 井 (GFD1) 地层与测录井综合柱状图 (1 : 200)

Fig. 10 Comprehensive histogram of stratigraphic units and logging of the Well GFD1 (1 : 200)

形成连片勘查面积为 11618 km², 从而开拓下扬子区奥陶系胡乐-宁国富有机质硅质页岩的资源勘查局面。

1.2 “一区两带”主要远景区页岩气资源潜力

根据自然资源部关于页岩气资源评价的技术要求, 综合考虑业界的通行做法, 远景区优选标准主要参考以下四方面因素: ①富有机质页岩层段厚度应大于 15 m, 富有机质泥页岩层段指有机碳含量、镜质体反射率均在 0.5% 以上的富含有机质泥页岩层系, 可夹少量砂岩、碳酸盐岩、硅质岩等其他岩性, 富有机质泥页岩累计厚度占层段厚度的比例不小于 60%; ②埋深介于 500~4500 m; ③页岩有机碳含量 (TOC) 不小于 0.5%; ④有机质热演化成熟度 R_o 介于 0.5%~3.5% 之间。

根据以上标准, 在下扬子及南华北地区圈定 9 个远景区: 江西丰城远景区、安徽宿州远景区、安徽淮南远景区、江西高安远景区、安徽宣城远景区、安徽巢湖—含山远景区、安徽南陵远景区、浙江江山远景区、浙江桐庐远景区, 采用概率体积法估算各远景区 P50 预测资源量 (赵文智等, 2008; 张金川等, 2012; 邹才能等, 2010), 各远景区分布位置、范围、面积及估算的预测资源量、资源量丰度详见图 1、表 1 所示。参与计算的古生

界上古和下古远景区总面积为 42790 km², 预测地质资源量为 88924.05×10⁸ m³, 资源量丰度最高者为江西丰城二叠系煤系地层远景区, 为 8.116×10⁸ m³/km²; 丰度最低者为浙江桐庐中奥陶统硅质页岩远景区, 为 0.194×10⁸ m³/km²。其中江西丰城远景区、安徽宿州远景区、安徽淮南远景区、江西高安远景区、安徽宣城远景区这 5 个上古生界二叠系远景区页岩气资源量丰度介于 1 和 10 之间, 属于常压页岩储层、中低丰度页岩气藏; 而安徽巢湖—含山远景区、安徽南陵远景区、浙江江山远景区、浙江桐庐远景区这 4 个下古生界志留系、奥陶系、寒武系远景区页岩气资源量丰度属于特低丰度页岩气藏 (付广等, 2008; 陈晓红, 2013; 何文军等, 2018; 方志雄, 2019)。目前页岩气资源丰度分类评价仍处于不断探索中, 此次资源量研究参照了中国大中型气田资源储量丰度分类标准, 估算结果仅用于学术研究, 不作他用。

资源量初步估算和资源潜力初步评价结果表明下扬子页岩气藏属于中低丰度页岩气藏 (赵文智等, 2008; 陈晓红, 2013)。赵文智等 (2016) 指出, 中国陆上海相和陆相大型坳陷盆地向斜区具有发现大型气藏的良好前景。经分析认为, 下扬子古生界坳陷型盆地在经历了中生代多期陆

表 1 下扬子及南华北区主要远景区页岩气资源量及资源量丰度

Table 1 Resources estimation and resources abundance of shale gas in the main prospecting areas in the lower Yangtze area and the southern North China zone

按资源量丰度排序	远景区	目的层	面积/ km ²	预测资源量/ ×10 ⁸ m ³	资源量丰度/ ×10 ⁸ (m ³ /km ²)
1	江西丰城远景区	P (乐平组、茅口组、小江边组)	2688	21814.74	8.116
2	安徽宿州远景区	P (上石盒子组、下石盒子组、山西组、太原组)	7598	26930.16	3.544
3	安徽淮南远景区	P (上石盒子组、下石盒子组、山西组、太原组)	6986	18670.26	2.673
4	江西高安远景区	P (乐平组、茅口组、小江边组)	5860	10748.73	1.834
5	安徽宣城远景区	P (大隆组、龙潭组、孤峰组、栖霞组)	3809	4443.23	1.167
6	安徽巢湖—含山远景区	O ₃ w—S ₁ g (上奥陶统五峰组—下志留统高家边组)	3339	2266.47	0.679
7	安徽南陵远景区	O ₃ w—S ₁ g (上奥陶统五峰组—下志留统高家边组)	2936	1175.79	0.400
8	浙江江山远景区	ε ₁ h (下寒武统荷塘组)	5036	1993.53	0.396
9	浙江桐庐远景区	O ₂ h—n (中奥陶统胡乐组、宁国组)	4538	881.14	0.194
合计	下扬子中带、南带及南华北淮南、宿州地区		42790	88924.05	—

内改造后转变为了多凹断陷型盆地 (多期裂陷槽、如图 2 所示), 总体上由早期的挤压沉降变为了晚期的拉张抬升, 因此并不利于页岩纳米孔缝超压源储页岩气的成藏, 但这并不能在根本上全面否定局部超压源生源储页岩气赋存成藏的可能性, 问题的复杂性也就在于此。

尽管下扬子地区与中上扬子同属于扬子陆块, 古生界原型沉积盆地均经历了中生代多期陆内改造, 具有相似的沉积生烃演化史, 但下扬子页岩气的成藏主控因素有着它的特殊性和差异性, 还不能直接参照中上扬子油气页岩气取得突破的成功思路和模式。根据多年的页岩气地质调查实践, 文章梳理了下扬子陆块特殊的地质特点和复杂性, 针对性地剖析了制约下扬子页岩气突破的难点, 提出了页岩气突破的方向。

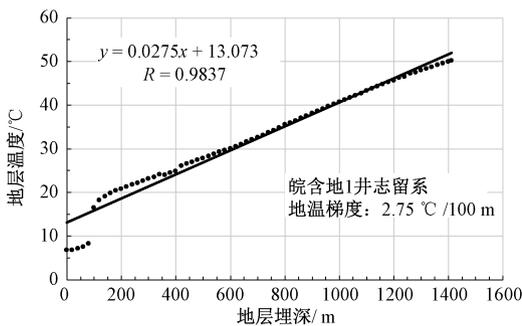
2 下扬子构造保存条件认识不足制约了页岩气突破

2.1 下扬子页岩气构造保存的实质性问题

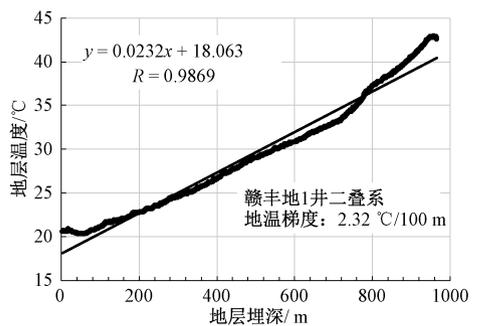
下扬子古生界页岩气是固态沉积有机质 (干

酪根) 热降解成液态烃、液态烃进一步热裂解的产物 (需要大埋深和高温高压条件) (邹才能等, 2010, 2013, 2015, 2016; 张金川等, 2012)。然而, 根据已钻井地温梯度 (图 11、图 12) 和有机质成熟度 R_o 估算出下扬子古生界地层普遍经历了不同期次大范围的抬升, 这在很大程度上很难保证构造定型期早于最晚一期的关键生烃成藏期这个圈闭有效性的先决条件, 因此不利于源外游离态页岩气或天然气的保存。下扬子古生界有利于页岩气保存的调查勘探方向应该是源内游离态和源内吸附态超压源储保存, 加之多期构造变形和破碎, 依靠“上盖侧封”的构造高点保存和断层遮挡保存, 在下扬子地区尤其核心区带苏皖南沿江拗陷带显然是十分不利的调查勘探方向。

与构造有关的勘探方向是找到与背斜构造、断裂构造以及与不整合面有关的油气田和油气聚集带; 与沉积 (岩性) 有关的勘探方向是找到与各类斜坡上倾尖灭砂体或岩性尖灭带或岩性透镜体有关的岩性圈闭, 确定沉积砂体或生物礁等沉积体的位置和形态; 与有效储集空间结构有关的勘探方向是区分储集空间结构的尺度和孔隙度



(a) 志留系地层地温梯度



(b) 二叠系地层地温梯度

图 11 下扬子地区上、下古生界地层地温梯度

Fig. 11 Geothermal gradient of the upper and lower Paleozoic formations in the lower Yangtze area

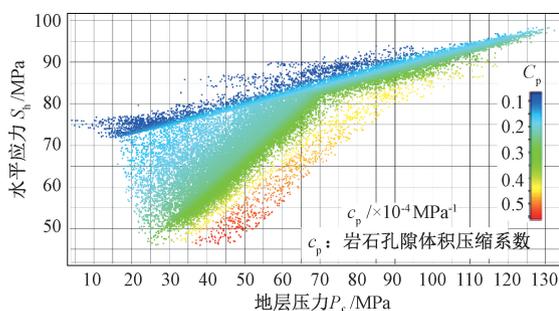
埋深/m	地层温度/°C	生烃门限			地温梯度 (°C/100 m)
		生油窗	生气窗	门限	
1000	31~56				1.6~3.1 平均2.41
2000	46~96				
3000	60~140				
4000	80~180			3800 m 150 °C	
5000	95~210				
6000	160~320				

图 12 下扬子地区古生界二叠系生烃门限深度和地层温度

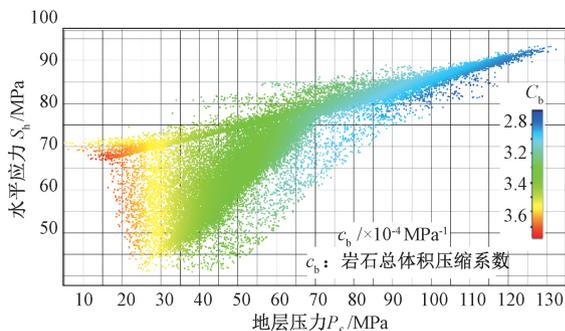
Fig. 12 Temperature and depth of hydrocarbon threshold in the Paleozoic Permian formations in the lower Yangtze area

(实质就是区分吸附态和游离态或扩散相,或者说区分源生源储成藏或源外二次运聚成藏);与流体单元分布有关的勘探方向就是确定气藏成藏单元主控因素的分布。

显而易见,实际调查勘探页岩气分布时到底是受控于构造、沉积、储层、流体这四个方面还是受控于某一个或几个方面的影响,甚至是受控于纯粹的超压自封存的影响,并非是主观意愿决定的,而是由地质调查或勘探开发阶段及其所拥有的资料条件和研究程度决定的,客观上四个方面的保存条件认识不足、页岩气如何被动态平衡的超压储集保存而成藏的技术创新研究程度不够极大地制约了页岩气的突破。而保存条件的核心问题就是页岩气如何超压成藏动态平衡储集保存以及这种平衡保存是否受到破坏的问题。按照页岩气藏的构成要素分解,急需综合多学科一体化调查研究,查明保存条件在四个方面存在的基础地质问题:



(a) 岩石孔隙体积压缩系数、水平应力、地层压力耦合关系



(b) 岩石总体积压缩系数、水平应力、地层压力耦合关系

图 13 水平应力与地层压力耦合关系

Fig. 13 Coupling relationship between horizontal stress and formation pressure

- (1) 多期变形构造如何控盆控相(或者控坳)——多期变形构造控坳(凹);
- (2) 多源多期沉积泥页岩如何生烃(多坳控烃)——古坳(或古凹)页岩晚期生烃;
- (3) 相控条件下多级纳米孔缝如何成储(相控储集结构)——相控纳米孔缝成储;
- (4) 相控源储条件下动态超压平衡如何控制成藏(流体单元即气藏成藏单元主控因素)——相控源储超压控藏。

只有这样才能从构造保存、沉积地化保存、纳米孔缝源储保存、超压动态平衡保存等全方面查明页岩气保存条件,进而以保存条件为核心圈定远景区、优选有利目标区,并最终实现页岩气工业性突破。

显然,首要解决的关键地质问题是:构造多期变形和改造是否会破坏以及在多大程度上破坏古坳陷(或古凹陷)富有机质页岩的纳米孔缝超压源储成藏的动态平衡(成藏动力为地层压力即超压),这是页岩气保存条件问题的核心和关键所在。换言之,若要研究构造变形改造(水平挤压或拉张、垂直抬升或沉降)如何影响超压动态平衡,而构造变形和演化主要受控于地应力(水平应力和垂直应力),那么,借助地质力学的理论和技术(张林炎等,2019;张浩等,2020),就把构造变形改造如何影响源内游离态和吸附态页岩气成藏的问题转化为了地应力如何与地层压力耦合变化的问题(图13),或者说页岩气构造保存问题就转化为了地应力与地层压力耦合关系如何影响页岩气成藏动力超压平衡的问题,这正是“沉积相带是基础,构造保存是关键”这一中上扬子页岩气“二元论”调查勘探思路的实质所在。

作为成藏动力的地层压力(即孔隙流体压力)

与作为构造水平挤压或拉张关系紧密的最小水平

应力之间存在着双向耦合关系(图13)。一方面, 最小水平应力(水平挤压或拉张)或最小垂直应力(垂直抬升或沉降)控制着地下岩石孔隙和裂缝的发育(尤其纳米级孔缝); 另一方面, 在水平方向无应变且岩性不变的条件下, 泊松比为常量, 则最小水平外应力随最小垂直外应力增大而增大、岩石骨架颗粒有效应力也是水平随垂直增大而增大(Terzaghi, 1925; Wyllie et al., 1956; Newberry et al., 1957; Anderson et al., 1973; Walls and Dvorkin, 1994; Xu and White, 1995, 1996), 但实际地层条件下不可能在水平方向保持无应变和岩性不变, 更复杂的情况是, 不均衡压实(欠压实)、生烃转化、粘土矿物脱水转化以及构造抬升导致上覆岩层剥蚀和水热增压等因素所造成的体积膨胀, 会产生超压, 尤其是微观孔喉缝洞结构非均质性产生的瞬时超压会使岩石产生附加抗力, 会产生Gassmann效应, 即提高岩石物理动态表观模量和波速(Gassmann, 1951; Gardner et al., 1974; Thomsen, 2018), 造成高频小应变幅值载荷的动态模量(通常指测井岩石物理弹性模量、对应于 $0.5 \sim 1.0$ 兆赫兹高频、应变幅值为 10^{-6} 的小幅值响应)高于低频大应变幅值载荷的静态模量(通常指地震岩石物理弹性模量、对应于几赫兹至几十赫兹低频、应变幅值为 $10^{-5} \sim 10^{-3}$ 的大幅值响应), 从而导致岩石物理弹性模量与波速依赖于频率变化而产生频散, 即Biot频散和粒间喷流频散两种流固耦合机理。对于纳米级页岩孔喉缝洞结构而言, 随着深度增加、地层压力增大, 岩石孔隙体积会显著减小, 岩石孔隙体积压缩系数会随孔隙度降低而降低(李传亮等, 1999), 岩石总体积压缩系数也必然减小, 岩石将变得愈加不可压缩(脆性增强), Biot弹性系数趋近于低限孔隙度的最小值(孔隙度小于2%甚至趋近于0), 因此Biot频散往往小于2%甚至忽略不计(Biot and Willis, 1941, 1957; Newberry et al., 1957; Anderson et al., 1973), 故纳米级页岩孔喉缝洞结构非均质性产生的频散主要是粒间喷流频散。正如前面述及, 泥页岩的纳米级孔喉缝洞结构单元的微观非均质性从根本上必然产生欠压实、促进生烃转化、促进粘土矿物脱水转化从而在根本上导致超压的形成, 这种超压决定了粒间喷流频散的形成, 并体现在构造应力与地层压力及岩石压缩系数之间的耦合变化规律中。最小水平应力的

方向主要是产生储集空间结构如裂缝的方向, 如图13所示, 但它的增大集中反映了地层压力的瞬时增大即超压的形成, 地层压力的增大导致最小水平应力也增大。尤其是岩石孔隙体积压缩系数较低时, 岩石总体积压缩系数呈现有高有低的复杂变化, 水平应力与地层压力之间近似为线性正相关, 但水平应力对地层压力的影响变化并不强烈, 尤其是在地层压力较低为常压时, 水平应力对地层压力的影响更趋复杂的非线性。随着地层压力变大、水平应力变大, 线性正相关越明显且越收敛; 岩石孔隙体积压缩系数较高时(纳米级有机质孔缝发育时), 水平应力的变化对地层压力的影响更为敏感, 表明水平应力更多地影响着孔隙流体压力。超压将导致地层压力更为敏感地随着水平应力的增大而线性增大。岩石孔隙体积对岩石孔隙体积压缩系数影响很小(毕竟是纳米级孔隙体积), 而岩石的变形方式(压实变形还是压缩变形)和应力状态(张应力常压还是压应力超压)对岩石孔隙体积压缩系数影响较大。这一耦合关系的意义在于, 当获得研究区地层压力和地应力三维模型时, 可将这一定量耦合关系代入三维模型, 从而高效快速确定页岩气超压源储成藏单元是否受到破坏, 进而指导钻探部署和开发评价。图13的理论贡献还在于, 补充了多孔介质静力平衡方程中地层压力计算与水平应力变化无关的假设, 传统的做法通常都是假设水平应变幅值为零即岩性横向无变化、泊松比横向无变化来计算地层压力(Newberry et al., 1957; Gardner et al., 1974; Hudson, 1981; Han et al., 1986; 李传亮等, 1999)。

近年来实钻的下扬子古生界页岩气调查井和参数井中均未钻遇到超压页岩储层, 且均为常压页岩储层(范明等, 2018; 方志雄, 2019)。实钻获得的钻井液密度($1.03 \sim 1.07 \text{ g/cm}^3$)、地温梯度均为小于 $3 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ 的低异常均已得到证实(图11、图12; 方朝刚等, 2018; 滕龙等, 2019)。就页岩气微观成藏机理而言, 真正的页岩气是源生源储超压自封存的源内吸附态和源内游离态页岩气(邹才能等, 2010; 马永生等, 2018; 姜振学等, 2020), 靠介孔和微孔级别的有机质纳米孔缝提供的大量的占主导优势的比表面积作为有效储集空间, 形成于正常压实作用的早成岩作用阶段的生物成因硅以微晶石英聚集体形式与陆源碎

屑硅、黄铁矿一起构成页岩骨架颗粒支撑格架，有效抑制了压实作用，从而发育欠压实，保存了大量残留粒间孔隙，促进了有机质纳米孔隙的发育，此时的孔隙体积及孔隙度仅起到渗流通道的作用，对储集页岩气并不起到主导优势作用（姜振学等，2016，2020），所以源内吸附态是主要的、源内游离态是次要的。此时的孔隙度与渗透率等物性参数的关系是非线性关系（如图 14 中的志留系、奥陶系物性参数的非线性关系）。但如果反过来，孔隙度和渗透率的关系是线性关系（如图 14 中的二叠系物性参数为线性关系），则可以判定储集空间以中—宏孔为主的孔体积和源外游离态赋存占主导优势，此时的源外成藏则必须具备生、储、盖、运、圈、保六要素匹配条件方能有效成藏。图 14 表明上古生界二叠系恰恰以孔体积和孔隙度及游离态赋存占主导优势，下古生

界志留系、奥陶系、乃至寒武系则以比表面积及吸附态赋存为主导，二叠系页岩气或源外天然气成藏条件就必须具备生、储、盖、运、圈、保六要素匹配，但燕山晚期以来以拉张断陷为主要特征的大范围抬升和剥蚀破坏了构造保存所需的六要素匹配条件，难以形成有效的构造圈闭和岩性圈闭。地温梯度和热模拟实验证实了燕山期的大范围抬升并大致预测了二叠系抬升量约为 3000~4200 m、志留系约为 6000 m、寒武系约为 9000 m（解习农等，2017）。而下扬子古生界二叠系钻井获取的页岩气赋存相态与地层压力和埋深的关系图版（图 15）又表明 2000 m 以浅的埋深以游离态赋存相态为主，因此唯一的突破口就是增加钻探深度，向着生烃窗口深度进军，即打深不打浅，以临界深度以下的源内吸附态页岩气为主，以规避源外游离态页岩气构造保存条件的不利因素。

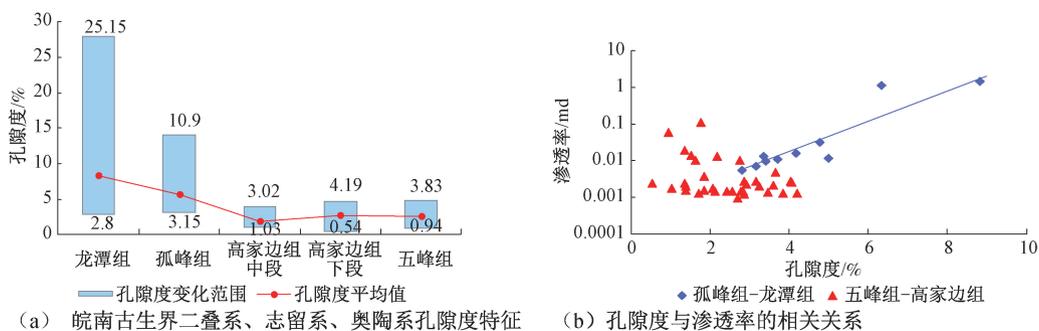


图 14 皖南古生界二叠系、志留系、奥陶系孔隙度分布及其与渗透率的相关关系

Fig. 14 Relationship between porosity and permeability, and porosity characteristics of the Paleozoic Permian, Silurian and Ordovician in southern Anhui

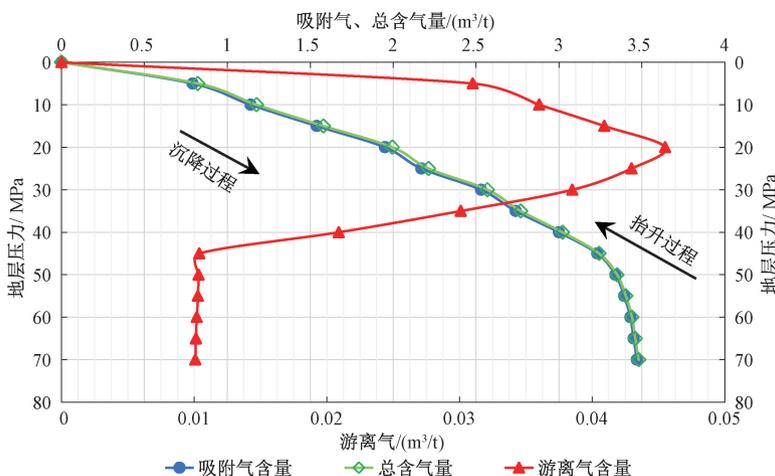


图 15 下扬子和南华北区古生界二叠系页岩压力-含气量的关系图版（实验室模拟换算：500~7400 m，30~250 °C）

Fig. 15 Relationship chart between formation pressure and gas content in the Paleozoic Permian shales in the lower Yangtze area and the southern North China zone (laboratory simulation conversion: 500~7400 m, 30~250 °C)

游离态页岩气含量出现拐点 (图 15) 的根本原因在于: 随着埋深增加、温度和压力增加到一定程度, 生烃转化已达临界点, 耗尽了源内液态烃, 没有了气源, 导致有机质出现炭化特征, 有机质成熟度 R_o 将不再增加反而降低, R_o 的拐点约为 3.5% (王玉满等, 2018), 有机质纳米孔隙比表面吸附气量也会趋于饱和而无法继续转化为游离态页岩气。因此, R_o 高于 3.5% 时, 有机质出现焦炭化则测井电阻率出现低值异常 (王玉满等, 2018)、比表面吸附能力降低, 超压消失、幕式排烃不再发生, 源内游离态页岩气的减少导致了源外游离态页岩气的降低。中下扬子地区盆缘转换带页岩储层多为常压储层 (何希鹏等, 2018), 故 2000 m 埋藏深度对应于 20 MPa 地层压力拐点 (图 15)。

2.2 多期变形构造如何控盆控相 (或者控坳)

多期变形构造如何控盆控相的问题实质就是通过物探地质一体化的技术手段恢复古生界海相沉积原型盆地, 查明原型盆地类型、构造演化期次及其与沉积原型盆地分布的耦合关系, 查明关键生烃成藏期的复杂构造样式与构造格局, 落实构造沉积盆地的沉降中心和泥页岩沉积中心, 编制古构造等深图和现今残留盆地构造埋深图, 解

决多期变形的构造运动和演化如何控盆 (或控坳、或控凹) 控相的问题。

对下扬子核心区苏皖南沿江坳陷区开展的地表露头、物探、钻测井、地质一体化的三维构造地质建模 (郑红军等, 2010, 2011, 2020), 首次定量表征和预测了古生界二叠系 (图 3、图 7、图 9、图 16)、志留系 (图 5) 主要目的层的现今残留四级构造单元的三维分布与空间埋深特征, 上古二叠系三维构造模型清晰刻画了现今的下扬子“中带”皖南沿江坳陷区 (简称皖江坳陷区) 夹持于滁河断裂和江南断裂之间呈北东向雁列式展布的多凹断陷特征, 如图 16—图 19 所示, 皖南沿江坳陷区二叠系大隆组底面现今埋深的五个四级构造单元富烃凹陷 (南陵凹陷、无为凹陷、宣城凹陷、望江凹陷、潜山凹陷) 与江南隆起、太湖—含山隆起、铜陵—繁昌隆起共同构成了“三隆五凹”的构造格局。这些雁列式多凹断陷作为多期构造叠加变形和改造的结果, 既有对古生界沉积原型盆地 (陆陆碰撞形成的陆缘拗陷槽和陆内坳陷槽) 继承和改造形成的晚期被动型陆缘裂陷槽, 也有中生代四期陆内改造形成的晚期主动型陆内裂陷槽 (晚期断陷)。

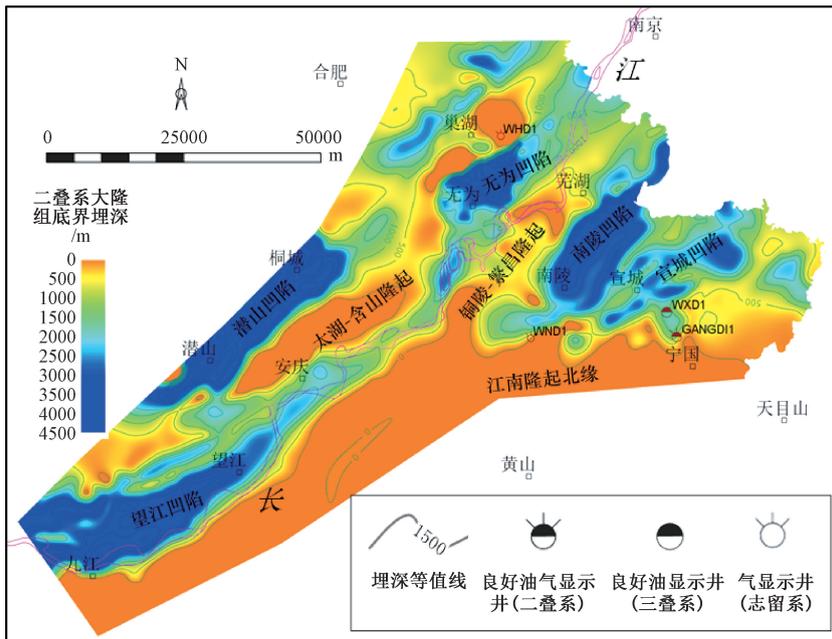


图 16 皖南沿江坳陷区二叠系大隆组底面现今埋深构造图 (三维构造建模结果)
 Fig. 16 Structural map of the present bottom boundary burial depth of the Permian Dalong group in the depression zone along the Yangtze River in southern Anhui (3D Modeling)

陆陆碰撞造成古生界发育三期三类原型沉积盆地, 控制三套富有机质泥页岩区域性分布。下扬

子古生界三类沉积原型盆地包括: ①晚震旦世—中奥陶世被动大陆边缘盆地 (控制发育下寒武统荷

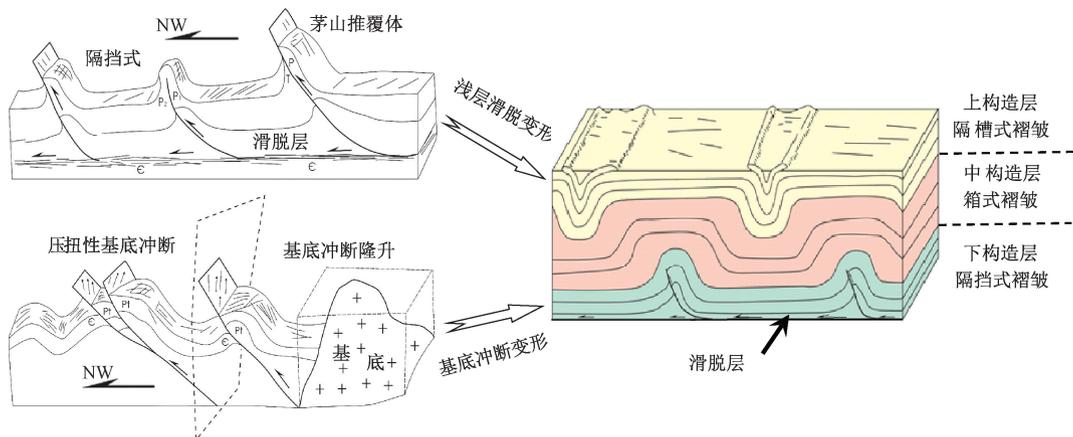


图 17 上下构造层构造变形方式及隔槽式、隔挡式褶皱的转换 (据王宗秀等, 2019 修改)

Fig. 17 Structural deformation mode of the upper and lower structural layers and the conversion of slot and block fold (modified after Wang et al., 2019)

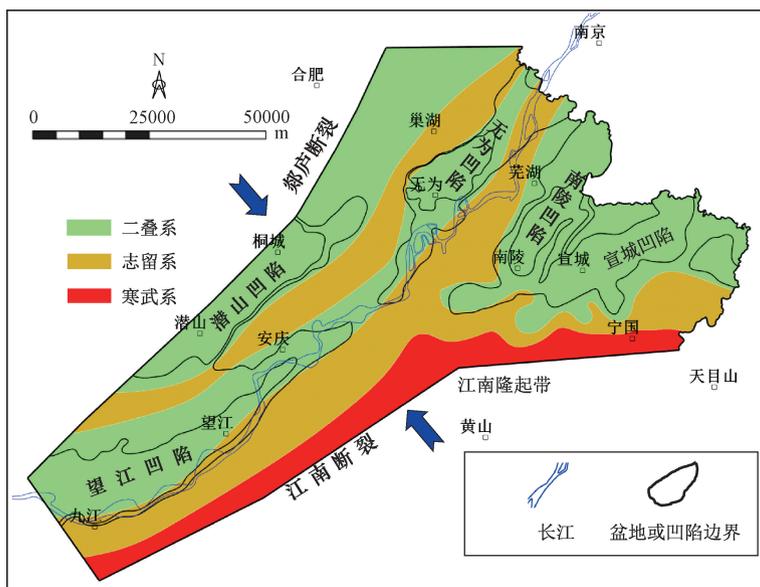


图 18 皖南沿江拗陷区“三带”与古生界富有机质泥页岩分布及富烃凹陷分布

Fig. 18 “Three belts” in the depression zone along the Yangtze River in southern Anhui and the distribution of organic shales in the Paleozoic and hydrocarbon-rich sags

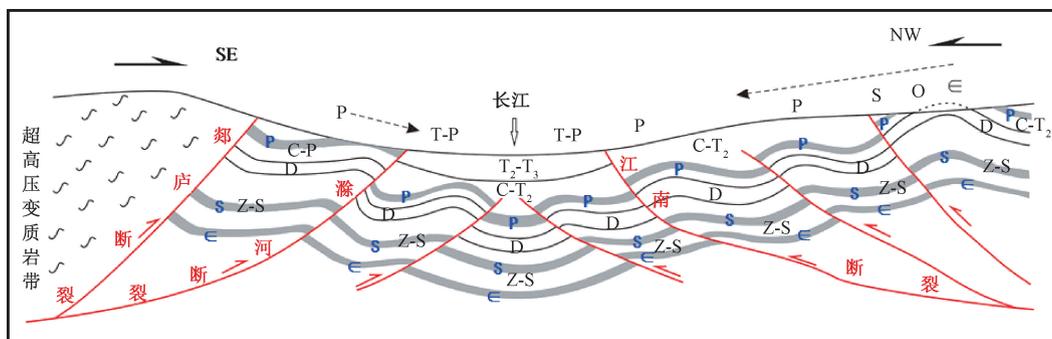


图 19 皖南沿江拗陷区印支晚期古生界沉积盆地原型

Fig. 19 Prototype of the Late Indosinian Paleozoic sedimentary basin in the depression zone along the Yangtze River in southern Anhui

塘组黑色页岩),②晚奥陶世—志留纪前陆盆地(控制发育上奥陶—下志留统高家边组页岩),③晚泥盆世—中三叠世海相克拉通盆地(控制发育中上二叠统孤峰组、龙潭组、大隆组页岩)。古生界原型沉积盆地为定型于印支早中期的北东向雁列式巨型拗陷槽及拗陷槽,如图18、图19所示。

中生代四期陆内改造导致中生界地层构造定型期较晚、构造样式复杂多变。中生代四期陆内改造主要包括晚印支至中侏罗世的叠加逆冲推覆与左旋走滑、晚侏罗至早白垩世的伸展走滑与岩浆爆发(二期前陆盆地)、晚白垩世至古近纪拉张断陷反转、新近纪断拗复合型伸展盆地。

下扬子陆块总体上经历了基底拆离—被动陆缘—志留系前陆盆地—海相克拉通—叠加逆冲推覆及走滑—二期前陆盆地—伸展断陷反转—断拗复合等多期构造变形与改造,为古构造后期破坏—重建—浅埋型。

下扬子古生界地层与构造单元后期大范围抬升导致大量下构造层隔挡式褶皱以浅层滑脱变形、基底冲断变形方式出露地表,并经燕山晚期以来拉张断陷反转改造,发育大量陆缘和陆内裂陷槽沉积盆地(凹陷或断陷),形成了现今北东向雁列式展布的多凹断陷裂陷槽沉积格局(图16—图18)。

皖南沿江拗陷区受古生界三套富有机质泥页岩生烃沉积中心纵向控制,平面上由南到北呈三个潜力带分布(图18)。以长江为中心线,长江以南地区由南向北依次发育南带(红色)、中带(橙色)、北带(浅绿色)三个带状区域,依次对应下寒武统、上奥陶—下志留统、中上二叠统富有机质泥页岩地层,长江以南地区的三套富有机质泥页岩地层整体向北西依次倾伏,形成沿江拗陷区南斜坡(图18—图19),因此沿江拗陷区由浅及深的二叠系、志留系、寒武系富有机质泥页岩地层主要分布在凹缘斜坡和凹缘隆起等凹缘转换带、且埋深变化很大,地质调查和勘探难度极大。根据上文述及钻探取得的地温梯度和有机质成熟度 R_o 与深度的关系数据分析,下扬子尤其是苏皖南和江西地区二叠系地层的地温梯度普遍偏低(图11、图12,整体介于 $1.7\sim 2.6\text{ }^\circ\text{C}/100\text{ m}$ 之间,苏北盆地除外),普遍经历了大幅度抬升,抬升量约有3000 m左右,二叠系地层有机质成熟度 R_o 介于 $0.9\%\sim 1.35\%$ 之间,估算生烃门限深度在3800~

4200 m(图12),对于调查和勘探源生源储型页岩气藏而言,钻探的二叠系地层生烃门限古埋深应该在4000 m左右,必须在现今残留构造埋深基础上,合理预测钻探深度。从这个角度而言,将二叠系作为首选突破层系实属不可逾越的现实选择。因此在构造变形稳定区、宽缓残留向斜区、古凹陷边缘隆起区和凹缘斜坡区、凹中隆、逆断层下盘(沿着目的层出露区向凹陷中央延伸)等构造部位寻找深水细粒沉积物发育区、纳米孔缝超压区进行部署方为现实的突破领域。

中上扬子于燕山晚期发育持续递进挤压的构造单元(郭旭升等,2014;翟刚毅等,2017),与此不同的是,下扬子古生界原型沉积盆地在经历了中生代四期陆内改造和抬升后,于燕山晚期(白垩纪末)发育拉张断陷反转构造,从而造成了下扬子现今陆缘和陆内裂陷槽拉张多凹断陷的构造格局,进而形成了构造控凹、多凹控相、控烃。因此,下扬子和中上扬子古生界以吸附态赋存的页岩气藏的共性在于都发育源生源储自封存页岩气藏,差异性在于下扬子大多数为常压储层、中低丰度或超低丰度页岩气藏,中上扬子多为超压储层、中高丰度页岩气藏(郭旭升等,2014;翟刚毅等,2017);而以游离态扩散相赋存的页岩气藏在下扬子因多期构造变形和破碎及构造定型期晚于最晚一期的关键生烃成藏期而使得“上盖侧封”的构造圈闭保存条件很难具备,但在中上扬子尤其上扬子却发育非常有利的“上盖侧封”的构造保存条件。

基于以上的分析,针对构造复杂程度、是否发育超压、源内与源外分别厘定不同的调查勘探思路 and 方向,进一步提升“多期变形构造控拗(凹)、古拗(凹)页岩晚期生烃、相控纳米孔缝成储、相控源储超压控藏”这一下扬子复杂构造区古生界页岩气“四元保存”的成藏地质认识,进一步提升理论和技术创新水平,一旦资料丰富程度足以支撑“四元论”向后延伸以至于攻克“相控纳米孔缝如何成储、相控源储超压如何控藏”的地质认识,必定会早日实现油气页岩气的重大工业性突破。

3 结论

(1) 调查评价了下扬子苏皖南沿江拗陷带、

江西萍乐-浙江钱塘坳陷带、南华北区“两带一区”古生界页岩油气资源潜力,有9口井4套层系获得“三气三油”的重要新发现,圈定了9个中低丰度远景区,初步评价了资源潜力,开辟了新区新层系,揭示了下扬子及南华北区中—古生界油气页岩气资源勘查潜力。

(2) 页岩气构造保存条件的实质是地应力与地层压力的耦合关系问题,通过探求这一定量关系,可以高效快速定量分析源内吸附态和源内游离态页岩气、源外游离态页岩气、源外二次运聚天然气藏之间的关系,制定针对性的调查勘探思路,指导有利钻探目标部署和勘探开发评价,有效支撑实现工业性突破。

(3) 下扬子古生界页岩气实现工业性突破的关键在于规避源外游离态构造保存的不利因素,向着源内超压吸附态和源内游离态赋存方式、向着生烃窗口深度开展调查和勘探,深化研究“多期变形构造控坳(凹)、古坳(凹)页岩晚期生烃、相控纳米孔缝成储、相控源储超压控藏”这一下扬子复杂构造区特有的古生界页岩气“四元保存”的成藏模式和成藏机理,力争早日获得实质性的工业突破。

(4) 地质力学理论和技术对油气页岩气微观成藏机理研究及调查勘探方向的选择至关重要,岩石物理和岩石力学参数是连接微观和宏观、静态和动态、地球物理化学参数和油气藏地质物性参数之间的关键桥梁。

(5) 三维地质建模手段能够最大限度将多学科、多尺度资料和数据快速高效整合,实现三维空间预测和定量分析、以及资源潜力全面而精细的定量评价,建议全面推广应用。

References

ANDERSON R A, INGRAM D S, ZANIER A M, 1973. Determining fracture pressure gradients from well logs [J]. *Journal of Petroleum Technology*, 25 (11): 1259-1268.

BIOT M A, 1941. General theory of three-dimensional consolidation [J]. *Journal of Applied Physics*, 12 (2): 155-164.

BIOT M A, WILLIS D G, 1957. The elastic coefficients of the theory of consolidation [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 24 (3): 594-601.

CHEN X H, 2013. Relations between the match types of source rock-cap rock and reserve abundances for large and medium gasfields in China [J]. *Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing*, 32 (2): 10-15. (in Chinese with English abstract)

DONG D Z, WANG Y M, LI X J, et al., 2016. Breakthrough and prospect of shale gas exploration and development in China [J]. *Natural Gas Industry*, 36 (1): 19-32. (in Chinese with English abstract)

FAN M, YU L J, XU E S, et al., 2018. Preservation mechanism of fuling shale gas [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 40 (1): 126-132. (in Chinese with English abstract)

FANG C G, TENG L, ZHENG H J, et al., 2018. On sedimentary facies and sequence stratigraphy characteristics of the Upper Maokou Formation “breaking platform” type in the Fengcheng area, Pingle depression [J]. *Journal of Yunnan University*, 40 (5): 935-946. (in Chinese with English abstract)

FANG C G, XU Z Y, TENG L, et al., 2019. Shale gas accumulation in the Upper Permian Leping Formation: A case study of well Ganfengdi-1 in the central Pingle depression, Jiangxi Province [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 41 (1): 83-93. (in Chinese with English abstract)

FANG Z X, 2019. Challenges and countermeasures for exploration and development of normal pressure shale gas in southern China [J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 9 (5): 1-13. (in Chinese with English abstract)

FU G, GENG Q, WANG Y G, et al., 2008. Pressure matching types between caprock and reservoir and relation between them and gas reserves abundance in gas reservoir [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 38 (4): 587-593. (in Chinese with English abstract)

GARDNER G H F, GARDNER L W, GREGORY A R, 1974. Formation velocity and density: The diagnostic basics for stratigraphic traps [J]. *Geophysics*, 39 (6): 770-780.

GASSMANN F, 1951. Über die Elastizität Poröser Medien (On the elasticity of porous media) [J]. *Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich*, 96, 1-23.

GUO X S, 2014. Rules of two-factor enrichment for marine shale gas in southern China: Understanding from the Longmaxi Formation shale gas in Sichuan Basin and its surrounding area [J]. *Acta Geologica Sinica*, 88 (7): 1209-1218. (in Chinese with English abstract)

GUO X S, HU D F, WEN Z D, et al., 2014. Major factors controlling the accumulation and high productivity in marine shale gas in the Lower Paleozoic of Sichuan Basin and its periphery: A case study of the Wufeng-Longmaxi Formation of Jiaoshiba area [J]. *Geology in China*, 41 (3): 893-901. (in Chinese with English abstract)

HAN D H, NUR A, MORGAN D, 1986. Effects of porosity and clay content on wave velocities in sandstones [J]. *Geophysics*, 51 (9): 2093-2107.

HE W J, YANG H B, FEI L Y, et al., 2018. Comprehensive analysis of tight sandstone gas resource potential in the favorable area of Jiamuhe Formation in Xinguang area, Junggar Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 29 (3): 370-381. (in Chinese with English abstract)

HE X P, HE G S, GAO Y Q, et al., 2018. Geological characteristics

- and enrichment laws of normal-pressure shale gas in the basin-margin transition zone of SE Chongqing [J]. *Natural Gas Industry*, 38 (12): 1-14. (in Chinese with English abstract)
- HUDSON J A, 1981. Wave speeds and attenuation of elastic waves in material containing cracks [J]. *Geophysical Journal International*, 64 (1): 133-150.
- JIANG S, TANG X L, OSBORNE S, et al., 2017. Enrichment factors and current misunderstanding of shale oil and gas: Case study of shales in U. S., Argentina and China [J]. *Earth Science*, 42 (7): 1083-1091. (in Chinese with English abstract)
- JIANG Z X, TANG X L, LI Z, et al., 2016. The whole-aperture pore structure characteristics and its effect on gas content of the Longmaxi Formation shale in the southeastern Sichuan Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 23 (2): 126-134. (in Chinese with English abstract)
- JIANG Z X, SONG Y, TANG X L, et al., 2020. Controlling factors of marine shale gas differential enrichment in southern China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 47 (3): 617-628. (in Chinese with English abstract)
- КОВАЛЕВСКИЙ Е В, 2014. Geological modelling on the base of geostatistics [M]. LIU Y R, CAO Z L, ZHENG H J, et al., Trans. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese with English abstract)
- LI C L, KONG X Y, XU X Z, et al., 1999. Double effective stress of porous media [J]. *Ziran Zazhi*, 21 (5): 288-292. (in Chinese)
- MA Y S, CAI X Y, ZHAO P R, 2018. China's shale gas exploration and development: Understanding and practice [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 45 (4): 561-574. (in Chinese with English abstract)
- NEWBERRY B M, NELSON R E, AHMED U, 1957. Prediction of vertical hydraulic fracture migration using compressional and shear wave slowness [C] //SPE/DOE Low Permeability Gas Reservoirs Symposium. Denver, Colorado: SPE: 459-466.
- PAN J P, QIAO D W, LI S Z, et al., 2011. Shale-gas geological conditions and exploration prospect of the Paleozoic marine strata in lower Yangtze area, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 30 (2-3): 337-343. (in Chinese with English abstract)
- TENG L, FANG C G, ZHENG H J, et al., 2019. The discovery of 'three natural gases' in the Upper Permian Leping Formation in Ganfengdi-1 well of middle Pingle depression [J]. *Geology in China*, 46 (1): 203-204. (in Chinese with English abstract)
- TERZAGHI K T, 1925. Principle of soil mechanics [J]. *Engineering News Record*, 95: 832-836.
- THOMSEN L, 2018. On the fluid dependence of seismic anisotropy: Beyond biot-gassmann [J]. *Journal of Earth Science*, 29 (6): 1335-1339.
- WALLS J D, DVORKIN J, 1994. Measured and calculated horizontal stresses in the travis peak formation [J]. *SPE Formation Evaluation*, 9 (4): 259-263.
- WANG X Q, TENG L, ZHENG H J, et al., 2019. Comprehensive evaluation of shale gas potential of Permian Leping Formation in Fengcheng-Leping area of Lower Yangtze Region [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 49 (1): 248-260. (in Chinese with English abstract)
- WANG Y M, LI X J, CHEN B, et al., 2018. Lower limit of thermal maturity for the carbonization of organic matter in marine shale and its exploration risk [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 45 (3): 385-395. (in Chinese with English abstract)
- WANG Z X, LI C L, LI H J, et al., 2019. Tectonic architecture and evolution of the eastern Sichuan-Wulingshan Area, South China [J]. *Journal of Geomechanics*, 25 (5): 827-839. (in Chinese with English abstract)
- WYLLIE M R J, GREGORY A R, GARDNER L W, 1956. Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media [J]. *Geophysics*, 21 (1): 41-70.
- XIE X N, HAO F, LU Y C, et al., 2017. Differential enrichment mechanism and key technology of shale gas in complex areas of South China [J]. *Earth Science*, 42 (7): 1045-1056. (in Chinese with English abstract)
- XU S Y, WHITE R E, 1995. A new velocity model for clay-sand mixtures [J]. *Geophysical Prospecting*, 43 (1): 91-118.
- XU S Y, WHITE R E, 1996. A physical model for shear-wave velocity prediction [J]. *Geophysical Prospecting*, 44 (4): 687-717.
- ZHAI G Y, WANG Y F, BAO S J, et al., 2017. Major factors controlling the accumulation and high productivity of marine shale gas and prospect forecast in southern China [J]. *Earth Science*, 42 (7): 1057-1068. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG H, SHI G, WU H, et al., 2020. In-situ stress measurement in the shallow basement of the Shanghai area and its structural geological significance [J]. *Journal of Geomechanics*, 26 (4): 583-594. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG J C, LIN L M, LI Y X, et al., 2012. The method of shale gas assessment: Probability volume method [J]. *Earth Science Frontiers*, 19 (2): 184-191. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG L Y, SONG L C, LI H J, et al., 2019. The role of geomechanics theory in the exploration of deep oil and gas in China [J]. *Journal of Geomechanics*, 25 (6): 1036-1047. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG M Q, LU Y C, 2012. Shale features and gas-source condition in the western Lower Yangtze area [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 25 (2): 9-17. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO W Z, WANG Z C, WANG H J, et al., 2008. Principal characteristics and forming conditions for medium-low abundance large scale oil/gas fields in China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 35 (6): 641-650. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO W Z, LI J Z, YANG T, et al., 2016. Geological difference and its significance of marine shale gases in south China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 43 (4): 499-510. (in Chinese with English abstract)
- ZHENG H J, CAO Z L, YAN C F, et al., 2010. Using seismic rock

- physics modeling to predict accumulation unit of biogenetic gas in Sanhu area [J]. *Lithologic Reservoirs*, 22 (4): 20-24, 42. (in Chinese with English abstract)
- ZHENG H J, ZHENG C L, TIAN L Y, et al., 2011. Using seismic stochastic modelling of petrophysics based on shear-wave model to predict distribution of natural gas reservoir: Taking northern slope in Sanhu region of Qaidam basin as example [J]. *Progress in Geophysics*, 26 (5): 1763-1770. (in Chinese with English abstract)
- ZHENG H J, 2018. What is the relationship between shale gas and oil-gas: Also Discussing the investigation direction and exploration ideas of shale gas and oil-gas in complex structural areas [J]. *Pictorial Geography*, 14: 20-21. (in Chinese with English abstract)
- ZHENG H J, ZHOU D R, TENG L, et al., 2020. Shale gas geological survey makes important new discoveries in Lower Yangtze region [J]. *News Letters of China Geological Survey*, 6 (1-2): 32-36. (in Chinese with English abstract)
- ZOU C N, DONG D Z, WANG S J, et al., 2010. Geological characteristics, formation mechanism and resource potential of shale gas in China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 37 (6): 641-653. (in Chinese with English abstract)
- ZOU C N, TAO S Z, HOU L H, et al., 2013. *Unconventional petroleum geology* [M]. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese)
- ZOU C N, DONG D Z, WANG Y M, et al., 2015. Shale gas in China: Characteristics, challenges and prospects (I) [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 42 (6): 689-701. (in Chinese with English abstract)
- ZOU C N, DONG D Z, WANG Y M, et al., 2016. Shale gas in China: Characteristics, challenges and prospects (II) [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 43 (2): 166-178. (in Chinese with English abstract)
- ### 附中文参考文献
- 陈晓红, 2013. 中国大中型气田源盖能力配置类型及其与储量丰度关系 [J]. *大庆石油地质与开发*, 32 (2): 10-15.
- 董大忠, 王玉满, 李新景, 等, 2016. 中国页岩气勘探开发新突破及发展前景思考 [J]. *天然气工业*, 36 (1): 19-32.
- 范明, 余凌杰, 徐二社, 等, 2018. 页岩气保存机制探讨 [J]. *石油实验地质*, 40 (1): 126-132.
- 方朝刚, 滕龙, 郑红军, 等, 2018. 萍乐坳陷丰城地区茅口晚期“破裂台地”型沉积相与层序地层学特征 [J]. *云南大学学报 (自然科学版)*, 40 (5): 935-946.
- 方朝刚, 徐振宇, 滕龙, 等, 2019. 江西萍乐坳陷中部赣丰地1井上二叠统乐平组页岩气聚气条件 [J]. *石油实验地质*, 41 (1): 83-93.
- 方志雄, 2019. 中国南方常压页岩气勘探开发面临的挑战及对策 [J]. *油气藏评价与开发*, 9 (5): 1-13.
- 付广, 庚琪, 王有功, 等, 2008. 气藏盖层压力配置类型及与储量丰度的关系 [J]. *吉林大学学报 (地球科学版)*, 38 (4): 587-593.
- 郭旭升, 2014. 南方海相页岩气“二元富集”规律: 四川盆地及周缘龙马溪组页岩气勘探实践认识 [J]. *地质学报*, 88 (7): 1209-1218.
- 郭旭升, 胡东风, 文治东, 等, 2014. 四川盆地及周缘下古生界海相页岩气富集高产主控因素: 以焦石坝地区五峰组-龙马溪组为例 [J]. *中国地质*, 41 (3): 893-901.
- 何文军, 杨海波, 费李莹, 等, 2018. 准噶尔盆地新光地区佳木河组致密砂岩气有利区资源潜力综合分析 [J]. *天然气地球科学*, 29 (3): 370-381.
- 何希鹏, 何贵松, 高玉巧, 等, 2018. 渝东南盆缘转换带常压页岩气地质特征及富集高产规律 [J]. *天然气工业*, 38 (12): 1-14.
- 姜振学, 唐相路, 李卓, 等, 2016. 川东南地区龙马溪组页岩孔隙结构全孔径表征及其对含气性的控制 [J]. *地学前缘*, 23 (2): 126-134.
- 姜振学, 宋岩, 唐相路, 等, 2020. 中国南方海相页岩气差异富集的控制因素 [J]. *石油勘探与开发*, 47 (3): 617-628.
- 科瓦列夫斯基 E B, 2014. 基于地质统计学的地质建模 [M]. 刘应如, 曹正林, 郑红军, 等, 译. 北京: 石油工业出版社.
- 李传亮, 孔祥言, 徐献芝, 等, 1999. 多孔介质的双重有效应力 [J]. *自然杂志*, 21 (5): 288-292.
- 马永生, 蔡勋育, 赵培荣, 2018. 中国页岩气勘探开发理论认识与实践 [J]. *石油勘探与开发*, 45 (4): 561-574.
- 潘继平, 乔德武, 李世臻, 等, 2011. 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*, 30 (2-3): 337-343.
- 滕龙, 方朝刚, 郑红军, 等, 2019. 萍乐坳陷中部 (赣丰地1井) 二叠系乐平组获“三气”发现 [J]. *中国地质*, 46 (1): 203-204.
- 王修齐, 滕龙, 郑红军, 等, 2019. 下扬子丰城-乐平地区二叠系乐平组页岩气潜力综合评价 [J]. *吉林大学学报 (地球科学版)*, 49 (1): 248-260.
- 王玉满, 李新景, 陈波, 等, 2018. 海相页岩有机质炭化的热成熟度下限及勘探风险 [J]. *石油勘探与开发*, 45 (3): 385-395.
- 王宗秀, 李春麟, 李会军, 等, 2019. 川东—武陵地区构造格局及其演化 [J]. *地质力学学报*, 25 (5): 827-839.
- 解习农, 郝芳, 陆永潮, 等, 2017. 南方复杂地区页岩气差异富集机理及其关键技术 [J]. *地球科学*, 42 (7): 1045-1056.
- 翟刚毅, 王玉芳, 包书景, 等, 2017. 我国南方海相页岩气富集高产主控因素及前景预测 [J]. *地球科学*, 42 (7): 1057-1068.
- 张浩, 施刚, 巫虹, 等, 2020. 上海地区浅部地应力测量及其构造地质意义分析 [J]. *地质力学学报*, 26 (4): 583-594.
- 张金川, 林腊梅, 李玉喜, 等, 2012. 页岩气资源评价方法与技术: 概率体积法 [J]. *地学前缘*, 19 (2): 184-191.
- 张林炎, 宋立才, 李会军, 等, 2019. 地质力学理论对中国深层油气勘查的作用 [J]. *地质力学学报*, 25 (6): 1036-1047.
- 张敏强, 陆永潮, 2013. 下扬子西部地区泥页岩特征及气源条件评价 [J]. *中国海上油气*, 25 (2): 9-17.
- 赵文智, 汪泽成, 王红军, 等, 2008. 中国中、低丰度大油气田基本特征及形成条件 [J]. *石油勘探与开发*, 35 (6): 641-650.
- 赵文智, 李建忠, 杨涛, 等, 2016. 中国南方海相页岩气成藏差异性

比较与意义 [J]. 石油勘探与开发, 43 (4): 499-510.

郑红军, 曹正林, 阎存凤, 等, 2010. 利用地震岩石物理模拟预测三湖地区生物气成藏单元 [J]. 岩性油气藏, 22 (4): 20-24, 42.

郑红军, 郑长龙, 田连玉, 等, 2011. 横波岩石物理地震随机模拟预测天然气藏分布: 以柴达木盆地三湖地区北斜坡为例 [J]. 地球物理学进展, 26 (5): 1763-1770.

郑红军, 2018. 页岩气和油气到底什么关系—也谈构造复杂地区油气页岩气调查方向与勘探思路 [J]. 写真地理, 14: 20-21.

郑红军, 周道容, 滕龙, 等, 2020. 下扬子页岩气地质调查获得重要

新发现 [J]. 中国地质调查成果快讯, 6 (1-2): 32-36.

邹才能, 董大忠, 王社教, 等, 2010. 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, 37 (6): 641-653.

邹才能, 陶士振, 侯连华, 等, 2013. 非常规油气地质 [M]. 北京: 地质出版社.

邹才能, 董大忠, 王玉满, 等, 2015. 中国页岩气特征、挑战及前景 (一) [J]. 石油勘探与开发, 42 (6): 689-701.

邹才能, 董大忠, 王玉满, 等, 2016. 中国页岩气特征、挑战及前景 (二) [J]. 石油勘探与开发, 43 (2): 166-178.

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):

可扫码直接下载文章电子版, 也有可能听到作者的语音介绍及更多文章相关资讯

