

· 能源与矿产资源 ·

鄂西宜昌地区寒武系常规、非常规天然气显示及勘探意义

罗胜元¹, 陈孝红¹, 李培军¹, 唐协华²

LUO Shengyuan¹, CHEN Xiaohong¹, LI Peijun¹, TANG Xiehua²

1. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 湖北 武汉 430205;

2. 中国石油浙江油田分公司, 浙江 杭州 310023

1. Wuhan Center of China Geological Survey, Wuhan 430205, Hubei, China;

2. PetroChina Zhejiang Oilfield Company, Hangzhou 310023, Zhejiang, China

摘要:鄂西寒武系具有良好的油气成藏条件,但由于地层时代早、经历构造运动次数多,勘探成果不理想。近期在宜昌地区寒武系水井沱组获得页岩气流,并在寒武系天河板组、石龙洞组等多套层系获得了天然气显示,表明鄂西宜昌地区是寒武系页岩气、天然气的有利勘探区。以储集层为核心划分出水井沱组页岩气、天河板组-石龙洞组常规天然气成藏组合。寒武系水井沱组页岩生烃潜力大、含气性高,以页岩中的有机质孔和微裂缝作为储集空间,构成自生自储的页岩气藏;水井沱组页岩气测试获工业气流,气体组分中甲烷含量超过90%。宜地2井天河板组发生井喷,气体成分以甲烷为主,储集空间主要为半充填状裂缝和溶孔,地层水为氯化镁型,保存条件中等。石龙洞组砂屑云岩储层具有累计厚度大、低孔中低渗并局部发育高孔渗段的特点。以水井沱组富有机质页岩为烃源岩,以天河板组灰岩裂缝和石龙洞组白云岩孔洞为储集空间,以草家庙组含膏云岩和云质膏岩为盖层,组成垂向供烃的生储盖组合。油气成藏演化史分析表明,寒武系烃源岩在早志留世开始生油,早二叠世开始生气,晚三叠世达到生气高峰期,经历了多期次构造运动的改造,现全部转化为气态烃。宜昌地区为页岩气有利区,也是天河板组-石龙洞组常规天然气勘探的有利区。上述认识对鄂西地区寒武系天然气勘探领域的拓展具有重要指导意义。

关键词:页岩气;天然气;油气显示;成藏特征;寒武系;宜昌地区

中图分类号:P618.13 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2020)04-0538-14

Luo S Y, Chen X H, Li P J, Tang X H. Characteristics of conventional and unconventional shale gas displays of the Cambrian strata in Yichang area, West Hubei, and their exploration significance. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(4): 538-551

Abstract: The Cambrian strata in west Hubei have favorable hydrocarbon accumulation conditions, but it is difficult to obtain substantial breakthrough in exploration due to multiple tectonic movements and old strata. Recently, industrial gas flow was tested in the Cambrian Shuijingtuo Shale and a large quantity of natural gas was discovered in multiple formations, which represent an enormous potential gas resource in Yichang area. The proved and possible reserves of Cambrian formations include Shuijingtuo shale and Shilongdong-Tianheban carbonate, which represent the shale gas and conventional gas system respectively. Black rock series of the Shuijingtuo Formation has high hydrocarbon potential and shale gas content. Micropores in organic matter and microcracks in shale are reservoir space, which resulted in a self-generation and accumulation for shale gas. The test of Shuijingtuo shale revealed an industrial gas flow after horizontal well fracturing. Methane is the main constituent of gas sample with concentration exceeding 90%. Considering the well blowout with methane and formation water in the carbonates of the Tianheban strata, the carbonate reservoir must be semi-filled

收稿日期:2019-05-05;修订日期:2019-05-23

资助项目:国家科技重大专项《中扬子高演化页岩气赋存机理与富集规律研究》(编号:2016ZX05034001-002)及中国地质调查局项目《宜昌斜坡页岩气有利区战略调查》(编号:DD20179615)

作者简介:罗胜元(1986-),男,博士,工程师,从事页岩气、油气地质调查与研究工作。E-mail:loshyv@163.com

fracture and dissolved pores. The formation water is of magnesium chloride type and the storage conditions are medium. Sand-clastic dolomite of the Shilongdong Formation is characterized by large cumulative thickness, low porosity and low permeability with partly high reservoir property. The sedimentation of Cambrian strata in Yichang slope developed the gas play with organic shale of the Shuijingtuo Formation as the source rock, and the fractures in limestone of Tianheban Formation and dissolved pore in dolomite of Shilongdong Formation serve as the main reservoirs. Gypsum dolomite and shale constitute the main cap rock of the conventional gas system. All this constitutes a vertical gas system. An analysis of the evolution history of oil and gas accumulation shows that the Cambrian source rocks began to generate oil in the early Silurian, generated gas in the Early Permian, and reached the gas peak in the Late Triassic. After undergoing transformation of multiple stages of tectonic movement, all the petroleum reservoirs have been converted into gaseous hydrocarbons. All this shows that the study area might be the favorable area for shale gas accumulation in the Middle Yangtze region, and it is a new area for shale gas exploration outside the Sichuan Basin. The above understanding will play an important guiding role in the exploration of Cambrian shale gas and natural gas in west Hubei.

Key words: shale gas; natural gas; gas show; accumulation characteristics; Cambrian strata; Yichang area

鄂西地区寒武系烃源岩厚度大、质量好,且发育多套碳酸盐储集层,生储盖配置条件好,是油气勘探的重要区域之一。20世纪60年代以来,完成了大量的地面地质调查,在一些探井见可燃气显示。研究者对中扬子鄂西及其周缘地区的寒武系沉积相、烃源岩条件、储集层、保存条件、油气富集因素等方面开展了大量研究与探索^[1-8],认识到海相层系油气成藏条件的复杂性,勘探部署开始注重非常规与常规油气的结合^[9-12]。近期针对鄂西地区东部的宜昌下古生界油气勘探初见成效,自2014年宜地2井获得水井沱组高含气显示以来,多口井先后在宜昌地区获得良好的页岩气显示。宜页1井水井沱组现场解析获高含气页岩层,其水平压裂井宜页1HF井产气量为 $6.02 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,无阻流量为 $12.38 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;阳页1井水井沱组首次在未经压裂改造的情况下钻获页岩气流,其水平井阳页1HF井分33段压裂1836 m水平段,获最高产量 $17.14 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,稳定产量 $7.83 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的高产工业气流,另外在多套层系获得了天然气的显示^[13-16]。实际钻探证明宜昌地区寒武系水井沱组富有机质页岩厚度大、含气量高,是页岩气有利分布区,同时也是常规天然气勘探的潜在有利区。随着勘探理论、思路和技术的不断推进,重新认识鄂西地区天然气成藏特征,总结成功经验及制约勘探突破的关键难题,对实现油气重大突破尤为重要。本文以鄂西宜昌地区为例,总结了区域内寒武系油气显示,解剖了典型页岩气藏、常规气藏特征与成藏组合,探讨成藏演化史及勘探意义,以期鄂西乃至中扬子地区寒武系油气勘探部署提供地质依据。

1 区域地质特征

1.1 构造特征

鄂西宜昌地区在大地构造上位于华南板块北部、巴洪冲断带前缘的中扬子地块中北部地区(图1)。中扬子区以南北对冲、叠加为特色,可以划分出秦岭造山带南侧及江南造山带北侧推覆结构、江汉盆地陆相断陷区块断结构、湘鄂西区挤压隆升结构等3种典型构造^[17]。宜昌地区位于黄陵基底隆起带宜昌斜坡,北部为黄陵背斜,东边为当阳盆地,西边为秭归盆地,南边为宜都鹤峰复背斜。从地质力学角度看,该区为新华夏系一级构造第三隆起带南段与淮阳山字型构造体系的复合部位,以西部的天阳坪断裂为界,可将中扬子地区划分为江汉平原区和湘鄂西两大区块(图1)。

黄陵隆起位于宜昌地区西北部,其轴向为NE15°,南北长约75 km,东西宽近40 km。前南华纪变质杂岩分布于隆起的核部,主体为一套中深变质片麻岩、长英质粒岩和变质表壳岩系,后被新元古代黄陵花岗岩杂岩侵入,并被南华系不整合覆盖。震旦系—志留系环绕黄陵结晶基底分布,发育近南北向裙边褶皱,岩层向四周倾斜,东翼稍缓,倾角一般8°~15°,西翼较陡,一般倾角30°~40°,隆起周缘被新华断裂、仙女山断裂、天阳坪断裂、通城河断裂等不同方向的断裂构造环绕(图1)。隆起东南缘构造稳定,为一倾向南东的单斜构造,称为“宜昌斜坡带”。该区地理位置位于宜昌市南部长阳县、点军区一带,西北与黄陵隆起相连,东北以通城河断层为界,西南以天阳坪断层为界,面积达2150 km²,地表为白垩系—新近系覆盖。岩层一般走向北东,

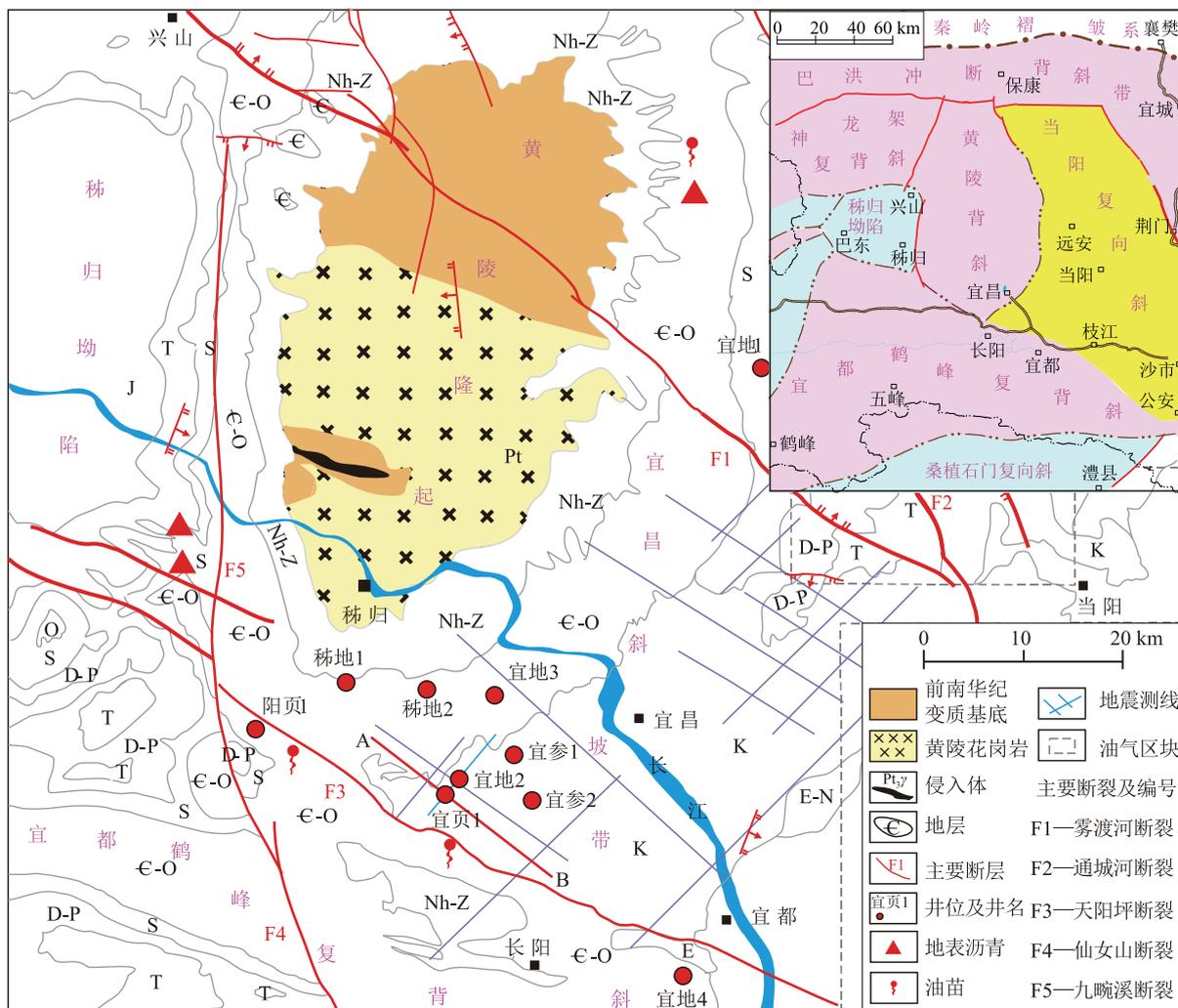


图1 鄂西宜昌地区地质概况及油气显示位置

Fig. 1 Geological base map and well location of the Yichang area, West Hubei

Nh-Z—南华系—震旦系; ε-O—寒武系—奥陶系; S—志留系; D-P—泥盆系—二叠系; T—三叠系;
 J₁—下侏罗统; J₂—中侏罗统; J-K—侏罗系—白垩系; E-N—古近系—新近系

倾向南东,倾角大多在 10° 以下。

1.2 地层与沉积特征

鄂西宜昌地区在黄陵穹隆核部崆岭岩群基底之上,发育中元古界—二叠系海相及白垩系陆相沉积,地层厚度6500~9000 m。研究区震旦系及下古生界发育良好,层序完整,许多地层单位名称在此处建立。前震旦系以浅变质白云岩、砂岩、板岩为主。震旦系自南向北超覆不整合于褶皱基底之上,下统以陆相碎屑岩及冰碛砾岩沉积为主,上统为硅质岩、白云质灰岩及白云岩,分布稳定。寒武系为稳定的滨浅海沉积环境,经历多期的海平面升降历程,沉积了大套浅海碳酸盐岩夹碎屑岩。奥陶系

继承了晚寒武世的陆表海潮坪环境,沉积了大套浅海相碳酸盐岩地层。志留系沉积古地理改变了自震旦纪以来以碳酸盐沉积为主的陆表海环境,转变为以陆源碎屑沉积为主的浅海陆棚环境,在晚奥陶世—早志留世龙马溪早期,由于华南海自南向北广泛海侵,沉积极细的硅质、泥质岩。泥盆系主要为一套滨海相碎屑岩沉积,宜昌地区缺失下泥盆统。石炭系沉积期,宜昌地区处于陆缘环境,岩石地层结构变化大,局部地层缺失,地层岩性多为碳酸盐岩夹碎屑岩。二叠系以开阔海台地相碳酸盐沉积为主,夹若干套陆地—滨岸沼泽相含煤碎屑岩、硅质岩等。三叠系是上扬子地层区由海相沉积转变为

陆相沉积的一次重要演化过程,宜昌地区中、下三叠统以陆棚-台地相碳酸盐岩沉积为主。侏罗系继承晚三叠世陆相盆地环境,属四川盆地西延部分的鄂西沉积区,沉积了一套湖泊相、河流-三角洲相的碎屑-泥炭岩沉积。白垩系为一套内陆山间断陷盆地沉积的红色碎屑岩系,在宜昌、当阳等地区广泛分布。

地表地质调查及大量钻井实钻表明,鄂西宜昌

地区寒武系可划分为下统水井沱组、石牌组、天河板组、石龙洞组;中统覃家庙组;中-上统娄山关组共 6 个组(图 2)。水井沱组下部以黑色炭质页岩为主夹“锅底”灰岩;上部以薄层灰泥岩为主,夹炭质页岩,厚度 167~239 m,为寒武系区域性烃源岩层。石牌组主要由页岩、砂质页岩、粉砂岩、砂岩夹薄层鲕状灰岩、生物屑灰岩等组成,厚度约 251 m,石牌组页岩厚度大,是区域油气盖层。天河板组主要为

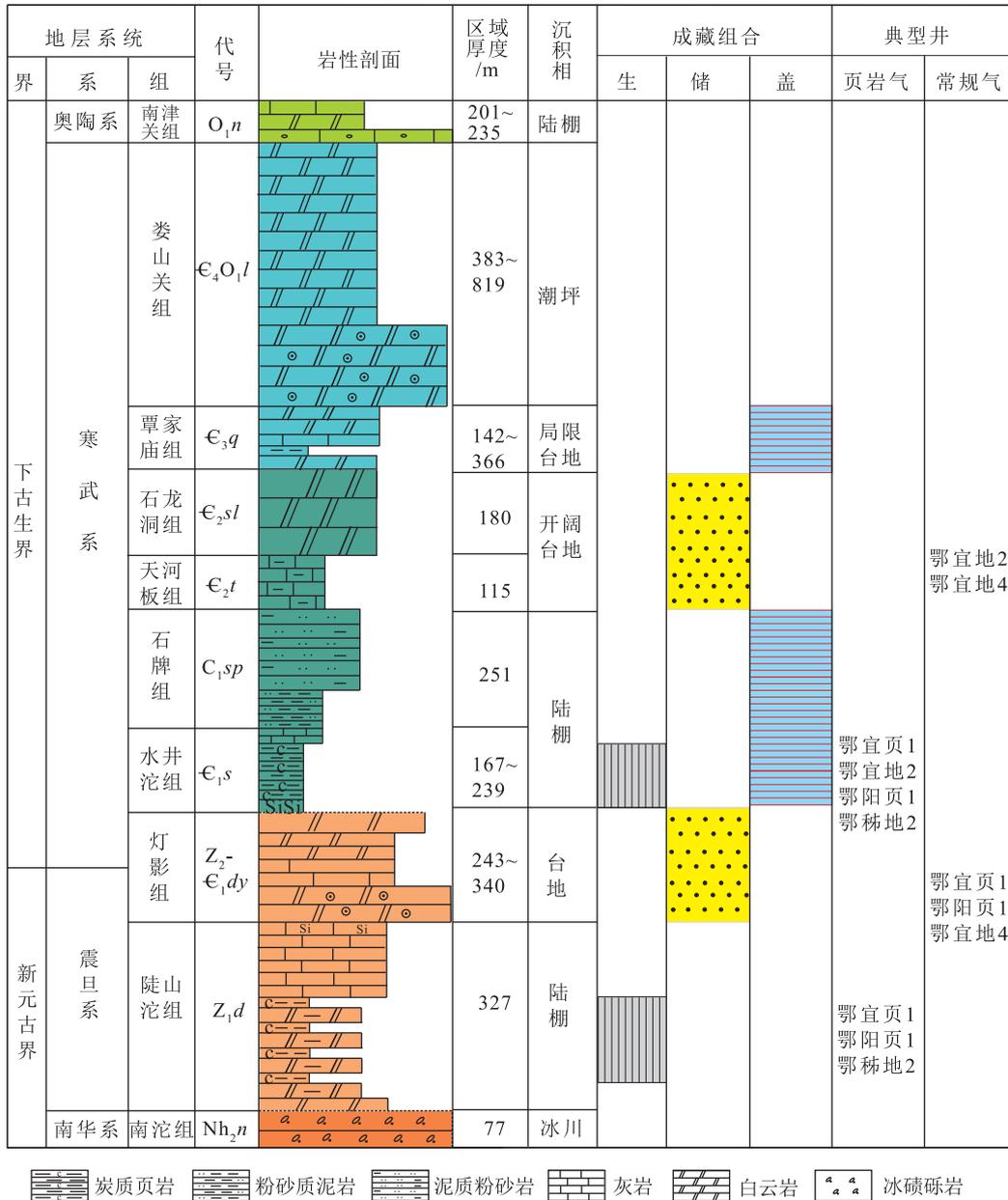


图 2 鄂西宜昌地区油气成藏组合综合柱状图

Fig. 2 Comprehensive columnar section of oil and gas formation reservoir assemblage in Yichang area, West Hubei

灰色薄层泥质条带灰泥岩夹粉砂质页岩,底部见鲕粒灰岩、竹叶状灰岩,厚度约 115 m。石龙洞组为浅灰、灰色中厚层状白云岩夹灰岩、角砾白云岩厚度约 180 m。天河板组和石龙洞组是鄂西地区寒武系重要的碳酸盐岩储集层。覃家庙组为灰色薄层状泥质白云岩、白云岩夹紫红色钙质页岩、硅质白云岩等,厚度 142~366 m,盖层发育膏岩、膏质云岩,具有良好的封盖条件。娄山关组下部为浅灰色厚层泥粒灰岩、含叠层石灰岩、微晶白云岩,组成潮下、潮间、潮上环境沉积;上部为厚层细晶白云岩、鲕状白云岩,属浅海台地环境沉积,厚度 383~819 m。宜昌地区震旦系陡山沱组为陆棚相沉积,下部为黑色页岩夹含燧石结核的泥质白云岩(图 2),含大量硅磷质结核,是区域性烃源岩层,厚度一般在 80~120 m;上部为含燧石结核的白云岩、灰岩。灯影组为台地相沉积的一套细晶白云岩、泥质灰岩,在顶部白云岩中广泛发育岩溶作用,是优质碳酸盐岩储集层。

2 油气特征

2.1 油气显示

宜昌地区是寒武系水井沱组富有机质页岩层系页岩气的有利目标区,并存在寒武系天河板-石

龙洞组天然气储层,已在多套层系见良好的油气、页岩气及地表油气苗、沥青显示^[1,18-19](图 1;表 1)。

(1) 寒武系天河板组天然气

宜地 2 井在寒武系天河板组下部气测显示明显上升,并发生井喷。气液分离点火成功,火焰高度可达 2~3 m 并持续数小时不灭。井喷段深度范围 1300~1378 m,厚度为 78 m,位于天河板组下部和石牌组顶部,为垂直裂缝发育的角砾状灰岩,测井解释含气层厚达 30 m,且存在气水分层现象(图 3)。天河板组下部岩性主要为深灰色泥晶灰岩、泥质条带灰岩,不规则高角度裂缝极发育,局部被方解石脉体充填。石牌组顶部岩性为灰色泥晶灰岩与灰绿色条带状泥岩等厚互层、或呈夹层状产出,裂缝十分发育,部分被方解石及黄铁矿充填。

对宜地 2 井天河板组井喷含气段地层水取样分析表明,地层总矿化度为 1302 g/L,pH 值为 7.27,其中 Cl^- 离子浓度为 34.56 g/L, SO_4^{2-} 离子浓度为 730.2 g/L,其次 HCO_3^- 离子浓度为 193.3 g/L;阳离子中 Ca^{2+} 离子浓度最高,为 203.4 g/L,其次为 Mg^{2+} 离子,浓度为 95.67 g/L, Na^+ 、 K^+ 、 Sr^{2+} 离子浓度依次为 33.7 g/L、6.75 g/L、4.68 g/L。前人研究表明^[20],地层下部与地表大气降水隔绝呈封闭态的

表 1 宜昌地区寒武系天然气、页岩气显示

Table 1 Cambrian natural gas and shale gas showings in Yichang area

井名	类型	层位	含气性描述
宜页 1 井	页岩气	水井沱组	气测异常,全烃由 0.123% 上升到 18.965%,甲烷由 0.111% 上升到 14.143%;现场解析总含气量 0.58~5.48 m ³ /t,平均 2.05 m ³ /t,含气量大于 2 m ³ /t 的有 35 m,其水力压裂井宜页 1HF 井(水平段 1816 m)页岩气日产气量 6.02×10 ⁴ m ³
	页岩气	岩家河组	气测录井 0.6%~1.07%,现场解析总含气量 0.80~1.38 m ³ /t,平均 1.06 m ³ /t
阳页 1 井	页岩气	水井沱组	现场解析总含气量 0.32~4.48 m ³ /t,平均 2.3 m ³ /t;水平井阳页 1HF 井水力压裂获页岩气流,稳定产量 7.83×10 ⁴ m ³
	常规气	天河板组	天河板钻遇裂缝性天然气,全烃最高 66.89%
秭地 1 井	页岩气	水井沱组	现场解析总含气量 0.234~1.047 m ³ /t,甲烷含量 15.8%~92.57%
秭地 2 井	页岩气	水井沱组	气测录井全烃 0.57%~14.5%;现场解析总含气量 0.23~4.45 m ³ /t,平均 2.15 m ³ /t;最优质 30 m 层段平均含气量 2.88 m ³ /t
	页岩气	水井沱组	现场解析总含气量 0.17~5.58 m ³ /t,平均 2.39 m ³ /t,总含气量大于 2 m ³ /t 厚 46 m
宜地 2 井	常规气	天河板组	气测异常并发生井喷;全烃含量最高达 9%;天河板组底部发生井喷,气液分离点火火焰高可达 2~3 m 高
	常规气	覃家庙组	浸水实验有气泡,气测录井显示该段全烃有明显的上升
宜地 3 井	沥青	覃家庙组	沥青大量充填,见油侵染
宜地 4 井	页岩气	水井沱组	气测异常,全烃最高达 11%;现场解析总含气量为 0.5~3.13 m ³ /t,平均 1.54 m ³ /t
	沥青	石龙洞组	孔缝见沥青充填
宜昌龙王洞	沥青	中寒武统	页岩层间裂缝中充填沥青

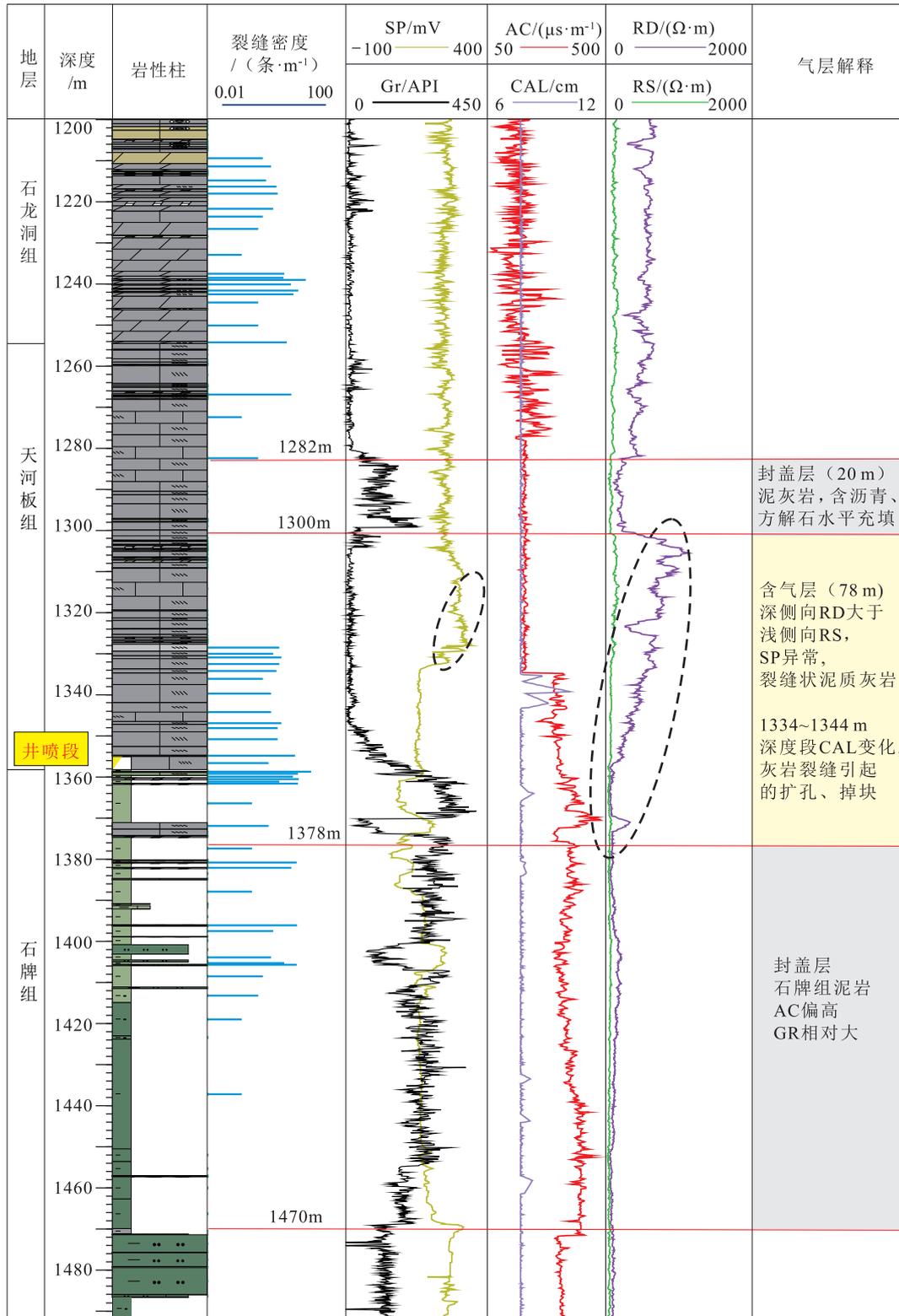


图 3 宜地 2 井天河板组含气层解释图

Fig. 3 Gas layer interpretation map of the Tianheban Formation in well Yidi-2

地层水多为氯化钙型,地层上部呈裸露状态或与大气降水相连通的地层水多属硫酸钠型、重碳酸钠型。参照苏林地层水分类,宜地2井井喷段产出的地层水为氯化镁型,处于封闭条件好的氯化钙型和封闭条件差的硫酸钠型之间的过渡带,表明天河板组天然气藏经历了一定的构造破坏作用,保存条件中等。

(2) 水井沱组页岩气

研究区有多口井钻获水井沱组优质页岩,大多显示含气性较好(表1)。宜地2井水井沱组1682~1728 m深度现场解析总含气量为0.364~5.57 m³/t,平均为1.85 m³/t,其中解析气量为0.194~3.65 m³/t。按含气量大小划分出3个层段,其中连续含气量大于2 m³/t的累计厚度达47.3 m(图4),页岩下部含气性最好,1702~1728 m深度段内平均含气量可达4.16 m³/t,解析收集到的气样组分中甲烷含量超过90%。阳页1井钻井过程中在水井沱组见气显示7层,气测全烃超过1.0%的水井沱组页岩层77 m,气测全烃超2.0%的页岩69.5 m,页岩实测有机碳含量最高3.82%,平均值超过1.8%,该井在在水井沱组连续取心83.17 m(2983.63~3066.80 m),岩心浸水后气泡剧烈,收集气点火可燃^[13],现场解析气最2.32 m³/t,总含气量最高达4.48 m³/t,其中2980~3055 m含气量高,平均总含气量可达2.3 m³/t。宜页1HF井为针对水井沱组实施的水平压裂参数井,使用油基泥浆密度为1.35~1.41 g/cm³,在垂深1856~1872 m页岩段进行水平段钻探,水平段长1838 m,试气测试日产天然气6.02×10⁴ m³/d,无阻流量12.38×10⁴ m³/d,压力稳定,地层压力系数在1.00~1.10之间,气体组分以甲烷为主,含量超过90%。

2.2 源储特征

(1) 水井沱组烃源岩与页岩气储层

水井沱组页岩是早寒武世早期南方大陆海底扩张造成的扬子地区大范围的一期完整的从海侵—海退的一套深水—浅水陆棚相富有机质页岩沉积^[21-22]。宜昌地区寒武系水井沱组富有机质页岩主要分布在下部,岩性为黑色炭质页岩、灰质页岩夹白云质灰岩透镜体,黑色页岩具有厚度大、分布广、生烃潜力大的特点。页岩有机碳含量(TOC)变化范围为0.52%~5.96%,平均2.26%(图4);页岩热演化程度高,等效镜质体反射率(R_o)范围为

2.18%~2.29%;全岩X-衍射分析数据显示,水井沱组连续页岩段矿物成分以石英、碳酸岩、粘土矿物等为主(图4),测试样品石英含量平均为11.4%~54%,平均为25.2%,粘土矿物含量为11.5%~61.3%,平均37.4%,碳酸盐含量为6.4%~62.6%,平均为29.3%,另外含有少量的黄铁矿。氩离子抛光扫描电镜观察表明宜地2井水井沱组泥页岩有机孔、无机孔较发育,孔隙以微孔和介孔为主,发育少量大孔,孔径主要分布在0.5~1 nm和13~15 nm之间。

(2) 天河板—石龙洞组储集层

寒武系天河板灰岩为致密层,孔隙度为0.3%~3.0%,平均孔隙度为1.63%,渗透率一般小于 $2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。天河板灰岩储集空间主要与其垂直裂缝有关,该层下部灰岩储层裂缝较复杂,常与下伏石牌组上部泥岩中发育的垂直裂缝相伴生。部分灰岩较破碎呈角砾状,多期次方解石脉胶结,仍有晚期部分未充填的裂缝保留下来(图4),裂缝宽度1~3 cm,沿着缝壁充填方解石,中间未充填缝的宽度一般为0.5~1 cm。

石龙洞组溶蚀孔洞白云岩储层是区内重要的有利储层^[23],研究区石龙洞组可分为上、中、下3段,对142件样品物性测试分析表明,石龙洞组上、下段物性较好,孔隙度分别为0.5%~14.7%(平均5.72%)和1.9%~15.4%(平均8.05%),渗透率分别为 $0.160 \times 10^{-3} \sim 245.51 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (平均 $19.28 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)和 $0.027 \times 10^{-3} \sim 42.45 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (平均 $4.99 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$),该两段岩性主要是砂屑云岩和细晶云岩,白云岩多重结晶,溶孔和裂缝发育,针孔状溶孔的大小一般为1~3 mm。石龙洞组中段以灰质云岩和粉晶云岩为主,溶孔和裂缝不发育,物性较差,孔隙度为0.4%~10.8%,平均3.41%;渗透率分布范围为 $0.016 \times 10^{-3} \sim 83.986 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均值为 $1.06 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。岩心描述和薄片观察显示(图版I),石龙洞组普遍发育裂缝,且以半充填的高角度裂缝为主,局部被方解石全充填,同时可见较多的泥、炭质全充填压溶缝。参照《油气储层评价方法(SY/T 6285—2011)》^[24],石龙洞组上、下段属于低孔、中低渗碳酸盐岩储集层。

宜地2井石龙洞组主要属于内缓坡浅滩相沉积环境,原始沉积物为鲕粒、砂屑等,原始孔隙多以粒间孔隙为主,部分浅滩经过暴露后发生淡水溶蚀及不均匀云化作用,经海底胶结及浅埋藏胶结作用,大

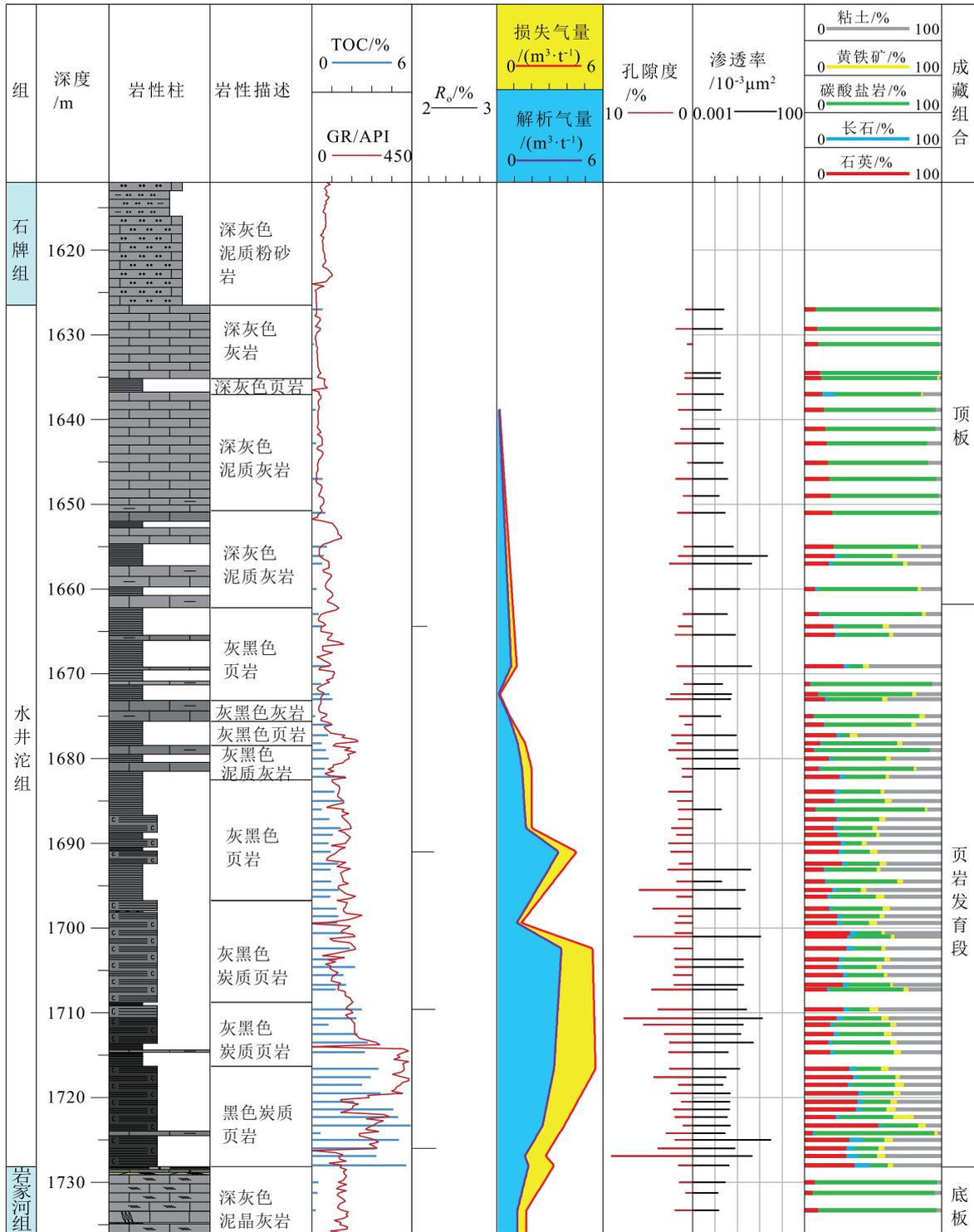
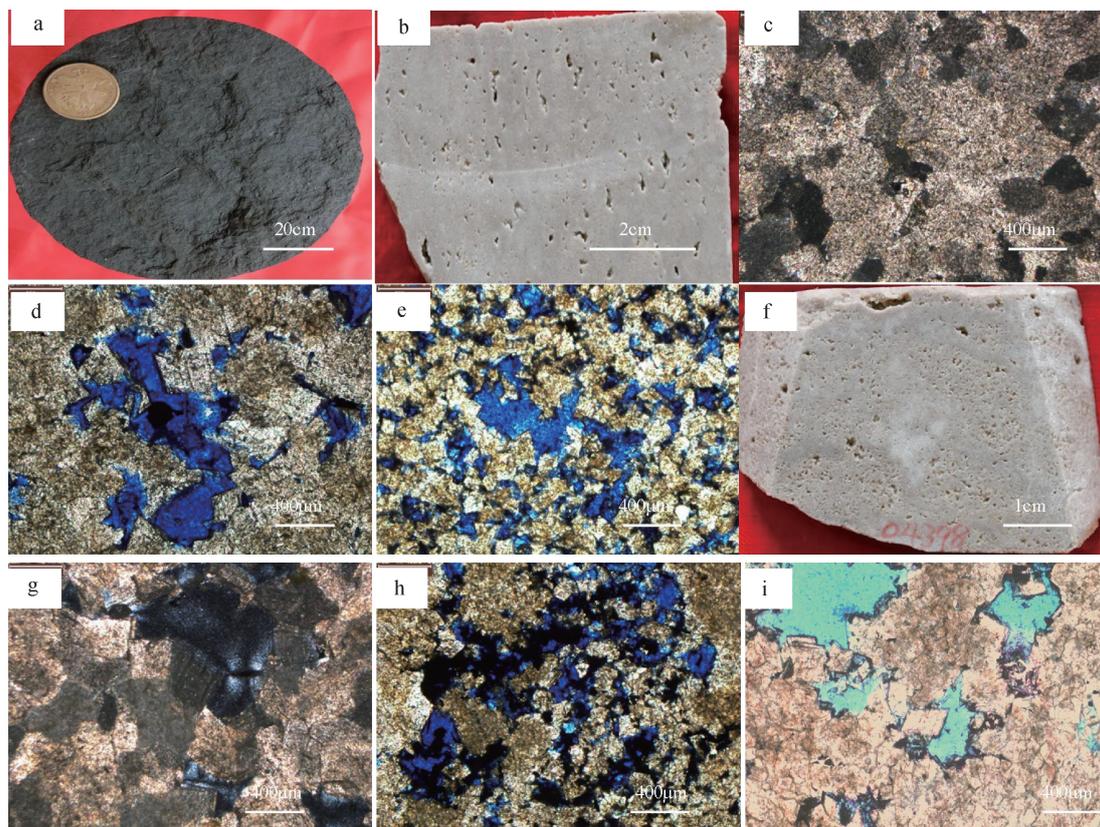


图 4 宜地 2 井页岩气成藏特征

Fig. 4 Shale gas accumulation features in Yidi-2 well

部分浅滩孔隙消失,但与暴露作用有关的白云岩仍保留有较多的晶间孔隙。经历多期构造运动之后,

石龙洞组出现多期裂缝,并发生多期与之相关的溶蚀作用,形成大量非组构溶孔。尽管在裂缝发育之



a.水井沱组富有机质页岩,宜页1井1857.49 m; b.天河板组砂屑白云岩,见大孔,宜地3井361 m; c.天河板组砂屑白云岩,宜地3井361 m; d.天河板组砂屑白云岩,晶间溶孔较发育,宜地4井460.85 m; e.天河板组砂屑白云岩发育大量晶间孔,粒间溶孔,宜地4井485.55 m; f.石龙洞组砂屑白云岩,宜地3井342.9 m; g.石龙洞组砂屑白云岩,宜地3井342.9 m; h.石龙洞组砂屑白云岩发育晶间溶孔,宜地4井417.55 m; i.石龙洞组发育晶间溶孔和晶间孔,宜地2井1144.4 m

后有化学充填作用,但仍有残留孔隙保存下来。与浅滩有关的白云石化晶间孔、埋藏溶蚀孔中均可见较多的沥青充填,表明这些孔隙在油气运移聚集过程中为有效孔隙。

2.3 盖层

王国芝等^[25]根据流体同位素化学特征,揭示出四川盆地及其周缘地区流体活动虽然具有跨层活动特性,但难以有效跨越中下三叠统膏岩层系发生大规模运移。膏岩层系被视为四川盆地的区域盖层,对常规油气和非常规气的保存都具有重要意义^[26-29]。膏岩类的区域盖层对寒武系页岩气的保存作用,主要表现为阻止膏盐岩层上、下层位的碳酸盐岩储层中流体发生交换^[30],维持膏岩下页岩层的压力体系,从而在区域形成一定范围的压力封闭,对页岩气保存有利。

中扬子区在中寒武世发生区域性海退,碳酸盐岩台地发育,并不断向南侧增生,受构造和古地理

格局的控制,中寒武世表现出有障壁海岸的局限海台地沉积,受大陆边缘浅滩的障壁作用,海水流通不畅,在强烈蒸发的潮坪环境中发育一套含膏云岩、石膏质云岩、泥质白云岩组合,局部在短时期内有盐湖沉积,发育云质膏岩。覃家庙组成膏期地层广泛分布,成为鄂西地区连片分布的油气盖层。相邻区域野外露头显示,宜昌两河口和宜昌乔家坪剖面膏溶角砾岩厚度均大于26 m,南漳朱家峪膏溶角砾岩厚29 m。从邻区已钻井焦石1、建深1、利1及簪深1井岩性分析发现,该区普遍发育膏盐岩,4口井含膏盐类地层厚度在84~160 m不等。实钻取心显示,研究区宜地2井覃家庙组盖层岩性主要为膏质岩类和泥质岩类2类(图5),盖层总厚度111.88 m,其中石膏质泥岩、含膏云岩、石膏质云岩等含膏类盖层厚89.54 m,含膏岩类多不纯,石膏多成斑块状分布于云岩中;泥岩、泥质条带灰岩等泥质岩类盖层厚22.34 m。测试表明,该井膏岩突破压力

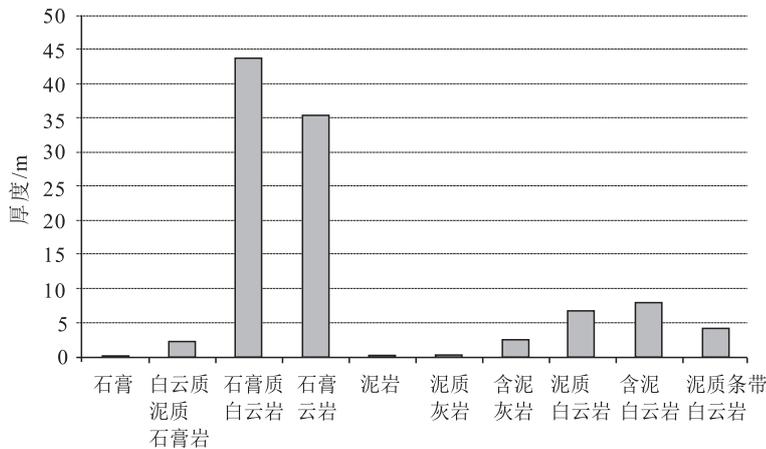


图 5 宜地 2 井寒武系覃家庙组不同岩盖层厚度分布直方图

Fig. 5 Histogram of capping thickness of the Qingjiamiao Formation in well Yidi-2

为 14.5~18.8 MPa, 孔隙中值半径小, 平均为 2.46 nm; 泥岩突破压力 10~12 MPa, 具有较好的封闭能力, 对盐下层有较好的保存条件, 可维持寒武系页岩层系压力系统, 对页岩气保存有利。

2.4 成藏组合

根据研究区钻井资料, 结合区域烃源岩、储层和盖层的分布, 寒武系可划分出 2 套主要生储盖组合(图 2)。

(1) 页岩气

以水井沱组富含有机质的炭质页岩为烃源岩, 水井沱组页岩中的有机孔和裂缝作为储集空间, 水井沱组本身的泥页岩作为盖层, 构成自生自储自盖型生储盖组合。宜昌地区寒武系构造稳定, 地层受构造改造较弱, 断层不发育。宜地 2 井水井沱组页岩储层顶板为厚 270 m 的低孔渗泥岩、泥质粉砂岩, 封盖条件好, 底板为一套致密的硅质岩、硅质灰岩, 封隔条件较好, 有利于页岩气的保存。

(2) 常规气组合

以水井沱组页岩为烃源岩, 以天河板组灰岩裂缝和石龙洞组白云岩溶蚀孔洞为储集空间, 以覃家庙组含膏云岩和云质膏岩为盖层, 组成垂向供烃, 下生上储上盖型生储盖组合。天河板组中上部夹薄-中厚层状亮晶团(球)粒白云岩及泥质生物屑微粒白云岩、豆粒白云岩, 石龙洞组为灰色中-中厚层状白云岩、含燧石结核微晶白云岩夹厚层状白云岩角砾岩, 与峡东、长阳的天河板组及石龙洞组相似,

具有丰富的溶蚀孔洞, 可以作为常规气储层。常规气的生储盖组合在鄂西渝东区的建南构造上钻探的建深 1 井、宜昌斜坡区钻探的宜地 2 井已得到证实, 宜地 2 井发育超过 100 m 厚的石龙洞组溶孔白云岩优质储层, 并在寒武系天河板组钻获裂缝型天然气显示。石龙洞组浅滩相白云岩储层与上覆覃家庙组膏盐盖层形成的储盖组合拓宽了中扬子地区常规油气的勘探领域。以前往往将娄山关组作为重要的储层来研究^[31], 但娄山关组厚度大, 且上覆奥陶系灰岩盖层的封盖能力远不如覃家庙组膏盐盖层, 这种滩相白云岩与泻湖膏盐的储盖组合在上扬子高石梯—磨溪地区已经得到勘探证实。

3 油气成藏演化史

随着晋宁期造山作用的结束, 黄陵基底基本形成, 黄陵隆起及其周缘地区自南华纪以来, 经历了漫长的地层沉积、埋藏、剥蚀等地质历史时期, 形成了如今从古元古代壳沉积、中元古代裂陷槽型建造、新元古代花岗岩侵位、新元古代—新生代盆地沉积等均有地层出露的构造区。加里东期和海西期, 黄陵隆起及其周缘地区作为扬子陆表海的一部分, 构造作用较弱, 整个时期处于稳定的海相沉积环境, 期间受地块整体抬升和海平面升降发育多套平行不整合界面; 印支期—燕山期和喜马拉雅期, 在强烈的构造作用下, 黄陵隆起及周缘地区发生较强的构造变形, 黄陵隆起及周缘地区地层经历不同的埋藏剥蚀演化, 造成各地区地层特征、有机质成熟度和成藏条件存在较大差异。

加里东期—海西期(Z-P)黄陵隆起南缘居于板内稳定地台环境, 构造变形非常微弱。总体以伸展作用为主, 形成克拉通盆地及小规模板内裂陷盆地, 表现为持续沉降与补偿充填作用, 接受了巨厚的海相沉积, 间隔小规模升降侵蚀或剥蚀夷平作用, 以在区域上具造山性质的加里东运动和东吴运动对测区的影响最明显, 造成地层间出现多个平行不整合界面。其中志留纪中晚期发生的加里东运动不仅造成大量地层缺失和古地理变迁, 而且影响持续时间较长, 使研究区长期处于震荡升降和沉积调整过程, 全区性的沉积间断集中

出现,至中二叠世才再次发生大规模的海侵。目前已钻探完成的宜页1井位于黄陵隆起南缘,终孔层位为南华系南沱组,完整地揭示了该地区震旦系以来保存的地层,该井震旦系厚度为441 m,寒武系厚度为1756 m,奥陶系南津关组揭示厚度为136 m,白垩系石门组揭示厚度为55 m。临井鄂宜地2井揭示寒武系厚度为1637 m,其中娄山关组遭受一定程度的抬升剥蚀,造成该井寒武系厚度较宜页1井略薄,白垩系石门组厚度为110 m。宜页1井揭示了震旦系、寒武系、奥陶系为整合接触关系,白垩系与下覆寒武系、奥陶系为角度不整合接触,表明印支期—燕山期强烈构造抬升剥蚀作用使黄陵隆起

南缘早古生代沉积地层大量缺失。

参考前人对中上扬子地区不同层系、不同时期构造演化及古埋深的分析^[32-35],对比区域地质背景和邻井资料,奥陶纪—早志留世黄陵隆起南缘为连续海相沉积,受加里东晚期运动及海西运动的影响,黄陵隆起南缘早泥盆世发生构造抬升,中晚泥盆世—晚石炭世接受间断性沉积和剥蚀,沉积厚度与剥蚀厚度基本相当(图6)。晚石炭世开始沉积埋藏,至中二叠世开始快速沉降,地层沉积厚度显著变大。二维地震资料揭示,宜昌地区震旦系—志留系、泥盆系、石炭系、侏罗系、白垩系等均表现为西北高东南低,地层产状稳定的单斜构造,不仅表明

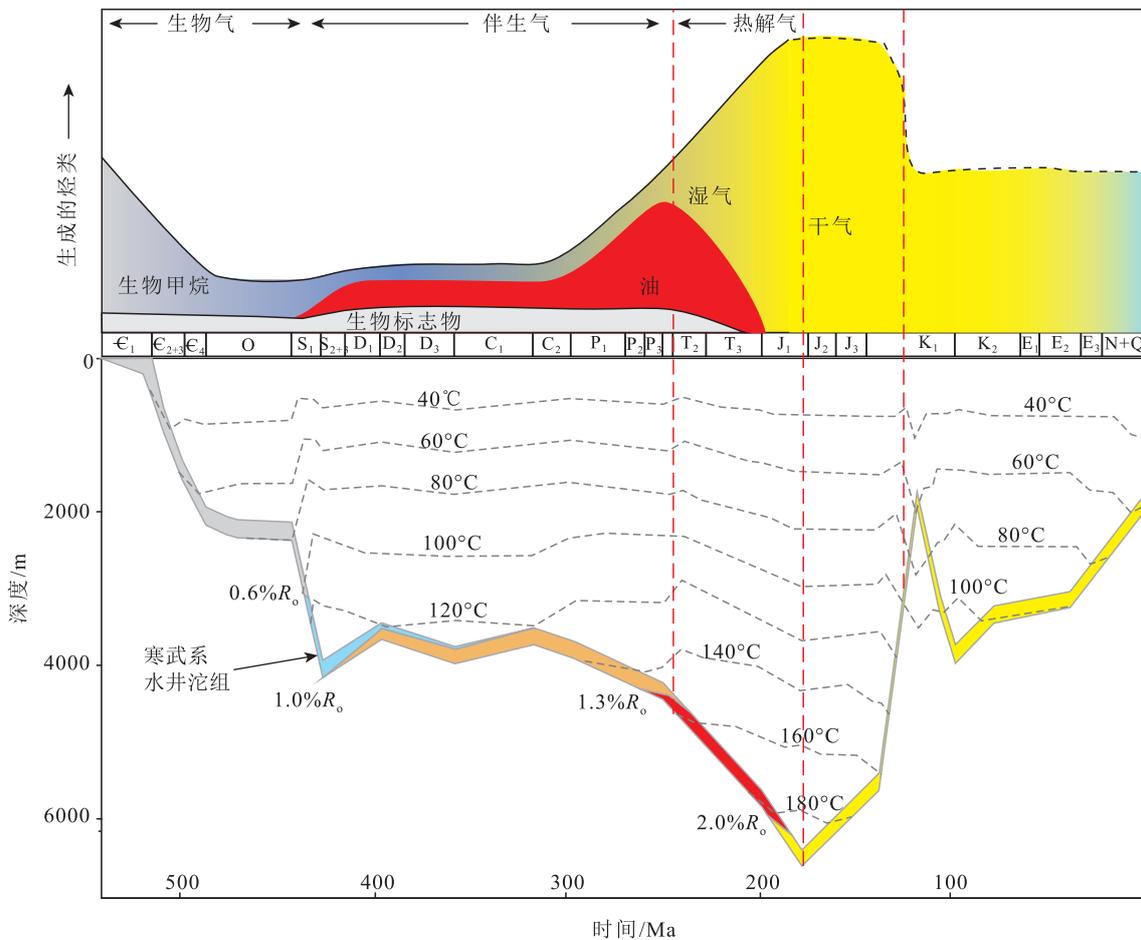


图6 宜页1井水井沱组热演化生烃史

Fig. 6 Hydrocarbon-generation evolution history of well Yiye-1

ϵ_1 —下寒武统水井沱组、石牌组; ϵ_{2+3} —中寒武统天河板组、石龙洞组、覃家庙组; ϵ_4 —上寒武统娄山关组; O—奥陶系南津关组—五峰组; S_1 —下志留统龙马溪组—小溪峪组; S_{2+3} —中上志留统; D_1 —下泥盆统; D_2 —中泥盆统云台观组—写经寺组; D_3 —上泥盆统; C_1 —下石炭统金陵组—高骊山组; C_2 —上石炭统大浦组—黄龙组; P_1 —下二叠统梁山组—栖霞组; P_2 —中二叠统茅口组; P_3 —上二叠统孤峰组—大隆组; T_1 —下三叠统大冶组—嘉陵江组; T_2 —中三叠统巴东组; T_3 —上三叠统; J_1 —下侏罗统; J_2 —中侏罗统; J_3 —上侏罗统; K_1 —下白垩统; K_2 —上白垩统; E_1 —下古近统; E_2 —中古近统; E_3 —上古近统; N+Q—新近系+第四系

宜昌地区板块整体结构稳定,对后期剥蚀量计算也有较强的指导作用。黄陵隆起南缘震旦系至奥陶系地层倾角为 $6^{\circ}\sim 8^{\circ}$,白垩系地层倾角为 2° 左右,上述研究可以推导出黄陵隆起南缘宜页1井地区中新生代以来地层埋藏演化特征。

前人对黄陵隆起中生代以来的构造演化做了大量研究^[18,36-38],通过裂变径迹、同位素定年等手段对黄陵隆起构造演化和剥蚀量恢复进行了定量分析,认为黄陵隆起核部中生代以来经历了4期构造演化阶段:200~140 Ma 缓慢冷却剥露阶段、140~80 Ma 快速冷却剥露阶段、80~40 Ma 剥露近停滞阶段、40 Ma 至今的快速冷却剥露阶段,受强烈的差异构造作用影响,200 Ma 以来地层埋藏演化存在较大差异。侏罗纪晚期,研究区受北部黄陵隆起强烈隆升作用,经历了强烈的构造抬升剥蚀,宜页1井剥蚀厚度达3500 m,其中在180~140 Ma 缓慢冷却剥露阶段,侏罗系剥蚀厚度约为1000 m;140~120 Ma 快速冷却剥露阶段,奥陶系—三叠系巨厚地层遭受剥蚀,剥蚀厚度超过2500 m。早白垩世,受东部江汉盆地拉张、沉降影响,黄陵隆起南缘东部地区沉积石门组,角度不整合覆盖在奥陶系和寒武系之上,沉积厚度约为1850 m;白垩纪晚期,受黄陵隆起第二阶段快速抬升剥露影响,下白垩统遭受剥蚀,剥蚀厚度约为500 m;80~40 Ma,整个黄陵隆起周缘地区构造活动较弱,处于剥露近停滞阶段;40 Ma至今,受喜山运动影响,黄陵隆起开始新一期的快速冷却剥露,下白垩统剥蚀厚度接近1300 m(图6)。对水井沱组8块页岩沥青反射率的143个测点统计表明, R_b 为2.74%~2.92%,平均为2.86%,测试离差为0.092%。利用 $R_o = 0.3195 + 0.679 \times R_b$ 公式^[39],换算镜质反射率 R_o 范围为2.32%~2.41%,平均为2.35%,页岩现今处于过成熟演化阶段。根据不同类型热事件特征,结合不同时期标准盆地热史数据,通过盆地模拟,获取了宜页1井地层埋藏—热演化史(图6)。

寒武系烃源岩在早志留世开始生油,中志留世进入生油高峰期,早二叠世开始生气,晚三叠世达到生气高峰期。由此可见,寒武系气藏由于生烃时间早,烃源岩演化程度均达高—过成熟阶段,并在燕山期前干酪根就已裂解成烃,经历多期构造运动的改造与破坏,地层剥蚀时间长,除致密页岩气藏外,原生的油气系统多发生了破坏、调整或重新分

配,现基本上全部转化为气态烃。

4 勘探意义

宜昌地区处于早古生代台地边缘,震旦系—志留系为多期次的陆棚叠加区,多种相带频繁交替,生、储、盖配置好。烃源岩条件优良,在地质历史时期长期处于黄陵古隆起的斜坡带,毗邻生烃中心,生烃强度大。寒武系天河板组—石龙洞组台缘浅滩分布,有利的沉积相带发育良好的溶蚀孔洞、裂缝型储集层。发育寒武系覃家庙组区域性膏、泥质云岩,宜昌地区已完钻多口井,在寒武系水井沱组页岩测试获高产工业气流,且多处在寒武系碳酸盐岩层系中获得天然气显示,表明其具有相对好的保存条件。加之宜昌斜坡带东南缘是在震旦纪末期就已隆升,直到喜马拉雅期才定型的长期继承性隆起区,具有形成规模油气田的基本地质条件。纵向上,形成水井沱组富有机质页岩生烃、天河板组—石龙洞组孔洞和裂缝为储集空间、覃家庙组含膏云岩和云质膏岩为盖层,组成垂向供烃、下生上储上盖型生储盖组合。

除自生自储的页岩气藏获得勘探突破外,常规天然气勘探也具有较大潜力,目前宜昌地区气藏勘探集中在深部地层圈闭和构造—地层复合圈闭上。寒武系烃源岩基本在印支运动前达到生气阶段,形成了早期的油气聚集,后期经历改造、调整。黄陵隆起作为元古宙刚性基底,构造活动以整体隆升、剥蚀为主,晚期构造对油气破坏作用相对较弱^[40-42]。一方面,燕山期、喜马拉雅期构造运动地层整体抬升、剥蚀,并产生有限的裂缝空间使油气散失;另一方面,侏罗系在前陆盆地背景下沉积的巨厚陆相碎屑岩层,以及白垩系陆相断陷盆地,均使下伏海相古生界得以有效保存,寒武系泥页岩和含膏盐岩埋深的加大增强了油气整体封闭性。由于隆起斜坡的继承性发展,斜坡成为油气运移的指向区^[43],成为气态烃富集的优势区带。整体看,宜昌地区寒武系页岩气和天然气勘探具有很大的潜力,是鄂西地区油气勘探的新领域,对整个南方海相油气勘探具有重要的指导意义。

5 结论

(1)宜昌地区已完钻多口井,在寒武系水井沱组页岩测试获高产工业气流,并多处在寒武系碳酸

盐岩层系中获得天然气显示,表明宜昌地区是天然气勘探的有利区域。

(2)寒武系水井沱组页岩生烃潜力大,烃源岩在早志留世开始生油,中志留世进入生油高峰期,早二叠世开始生气,晚三叠世达到生气高峰期。页岩含气性高,以页岩中的有机质孔和微裂缝作为储集空间,构成自生自储的页岩气藏,页岩气水平压裂井测试获工业气流。

(3)天河板组和石龙洞组以碳酸盐岩颗粒滩沉积为主,以溶孔、裂缝构成天然气储集空间,宜地2井发生井喷,气体成分以甲烷为主。总体上构成以水井沱组富有机质页岩为烃源岩,以天河板组灰岩裂缝和石龙洞组白云岩孔洞为储集空间,覃家庙组含膏云岩和云质膏岩为盖层,垂向供烃、下生上储上盖型的生储盖组合。

致谢:武汉地质调查中心的岳勇在取样及分析工作中给予了帮助和支持,中国地质大学(武汉)何生教授对论文撰写也给予了指导,审稿专家给予的宝贵建议,在此一并表示谢意。

参考文献

- [1] 梅廉夫,费琪.中扬子区海相地层中油气显示及其石油地质意义[J].石油与天然气地质,1992,13(2): 155-165.
- [2] 胡晓风.湘鄂西地区油气藏类型及勘探方向[J].石油与天然气地质,2002,23(3): 300-302.
- [3] 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(自然科学版),2003,30(2): 155-168.
- [4] 金之钧.中国海相碳酸盐岩层系油气形成与富集规律[J].中国科学:地球科学,2011,41(7): 910-926.
- [5] 郭战峰,盛贤才,胡晓风,等.中扬子区海相层系石油地质特征与勘探方向选择[J].石油天然气学报,2013,35(6): 1-9.
- [6] 邓铭哲,何登发,张煜颖.鄂西仙女山断裂构造演化及其对长阳背斜圈闭性的影响[J].石油实验地质,2018,40(2): 177-184.
- [7] Liu Z B, Gao B, Zhang Y Y, et al. Types and distribution of the shale sedimentary facies of the Lower Cambrian in Upper Yangtze area, South China[J]. Petroleum Exploration & Development, 2017, 44(1): 20-31.
- [8] 李艳霞,林娟华,龙幼康,等.中扬子地区下古生界海相泥-页岩含气勘探远景[J].地质通报,2011,30(2): 349-356.
- [9] 马永生,蔡勋育,赵培荣,等.四川盆地大中型天然气田分布特征与勘探方向[J].石油学报,2010,31(3): 347-354.
- [10] Zou C N, Yang Z, Tao S Z, et al. Continuous hydrocarbon accumulation over a large area as a distinguishing characteristic of unconventional petroleum: The Ordos Basin, North-Central China[J]. Earth-Science Reviews, 2013, 126(9): 358-369.
- [11] 邹才能,杨智,何东博,等.常规-非常规天然气理论、技术及前景[J].石油勘探与开发,2018,45(4): 575-587.
- [12] 黄文明,刘树根,马文辛,等.川东南-鄂西渝东地区下古生界页岩气勘探前景[J].地质通报,2011,30(2): 364-371.
- [13] 翟刚毅,包书景,王玉芳,等.古隆起边缘成藏模式与湖北宜昌页岩气重大发现[J].地球学报,2017,38(4): 441-447.
- [14] 陈孝红,危凯,张保民,等.湖北宜昌寒武系水井沱组页岩气藏主控地质因素和富集模式[J].中国地质,2018,45(2): 207-226.
- [15] 陈孝红,张保民,陈林,等.鄂西宜昌地区晚奥陶世-早志留世页岩气藏的主控地质因素与富集模式[J].地球学报,2018,39(3): 257-268.
- [16] 罗胜元,刘安,李海,等.中扬子宜昌地区寒武系水井沱组页岩含气性及影响因素[J].石油实验地质,2019,41(1): 56-67.
- [17] 焦方正,冯建辉,易积正,等.中扬子地区海相天然气勘探方向、关键问题与勘探对策[J].中国石油勘探,2015,20(2): 1-8.
- [18] 沈传波,梅廉夫,刘昭茜,等.黄陵隆起中-新生代隆升作用的裂变径迹证据[J].矿物岩石,2009,29(2): 54-60.
- [19] 梅廉夫,邓大飞,沈传波,等.江南-雪峰隆起构造动力学与海相油气成藏演化[J].地质科技情报,2012,31(5): 85-93.
- [20] 梁家驹,徐国盛,李昌鸿,等.江汉平原区古生界地层水化学特征与油气保存[J].断块油气田,2010,17(2): 129-133.
- [21] 李忠雄,陆永潮,王剑,等.中扬子地区晚震旦世-早寒武世沉积特征及岩相古地理[J].古地理学报,2004,6(2): 151-162.
- [22] 邱小松,胡明毅,胡忠贵.中扬子地区下寒武统岩相古地理及页岩气成藏条件分析[J].中南大学学报(自然科学版),2014,45(9): 3174-3185.
- [23] 盛贤才,郭战峰,刘新民.秦岭-大别造山带南侧兴山地区中上寒武统白云岩储层特征[J].石油实验地质,2009,31(2): 172-176.
- [24] 国家能源局.SY/T 6285-2011 油气储层评价方法[S].北京:石油工业出版社,2011.
- [25] 王国芝,刘树根.海相碳酸盐岩区油气保存条件的古流体地球化学评价:以四川盆地中部下组合为例[J].成都理工大学学报(自然科学版),2009,36(6): 631-644.
- [26] 金之钧,周雁,云金表,等.我国海相地层膏盐岩盖层分布与近期油气勘探方向[J].石油与天然气地质,2010,31(6): 715-724.
- [27] 聂海宽,包书景,高波,等.四川盆地及其周缘下古生界页岩气保存条件研究[J].地学前缘,2012,19(3): 280-294.
- [28] 郭旭升.涪陵页岩气田焦石坝区块富集机理与勘探技术[M].北京:科学出版社,2014.
- [29] 马奎,胡素云,王铜山,等.膏盐岩对碳酸盐层系油气成藏的影响及勘探领域分析[J].地质科技情报,2016,35(2): 169-176.
- [30] 杨建,王国芝,徐国盛,等.中扬子当阳复向斜带流体地球化学示踪及保存条件研究[J].矿物岩石,2010,30(4): 95-101.
- [31] 李旭兵,刘安,曾雄伟,等.雪峰山西侧地区寒武系娄山关组碳酸盐岩储层特征研究[J].石油实验地质,2012,34(2): 153-157.
- [32] 李天义,何生,何治亮,等.中扬子地区当阳复向斜中生代以来的

构造抬升和热史重建[J].石油学报,2012,33(2): 213-224.

[33] 袁玉松,林娟华,程心阳,等.鄂西渝东地区晚燕山—喜马拉雅期剥蚀量[J].地球物理学报,2014,57(9): 2878-2884.

[34] 邱登峰,李双建,袁玉松,等.中上扬子地区地史模拟及其油气地质意义[J].油气地质与采收率,2015,22(4): 6-13.

[35] Xu Z Y, Shu J, Yao G S, et al. Tectonic and depositional setting of the lower Cambrian and lower Silurian marine shales in the Yangtze Platform, South China: Implications for shale gas exploration and production[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2019, 170: 1-19.

[36] 刘海军,许长海,周祖翼,等.黄陵隆起形成(165~100 Ma)的碎屑岩磷灰石裂变径迹热年代学约束[J].自然科学进展,2009,19(12): 1326-1332.

[37] 葛翔,沈传波,梅廉夫.低温热年代对黄陵隆起中生代古地形的约束[J].大地构造与成矿学,2016,40(4): 654-662.

[38] 余武,沈传波,杨超群.秭归盆地中生代构造-热演化的裂变径迹约束[J].地质前缘,2017,24(3): 116-126.

[39] 丰国秀,陈盛吉.岩石中沥青反射率与镜质体反射率之间的关系[J].天然气工业,1988,8(3): 20-25.

[40] 梅廉夫,费琪,戴少武,等.中、下扬子区中、新生代陆内对冲带的形成及解体[J].地质科技情报,2008,27(4): 1-7.

[41] 何治亮,汪新伟,李双建,等.中上扬子地区燕山运动及其对油气保存的影响[J].石油实验地质,2011,33(1): 1-11.

[42] 郭战峰,盛贤才,胡晓凤,等.中扬子区海相层系石油地质特征与勘探方向选择[J].石油天然气学报,2013,35(6): 1-9.

[43] Guo X S, Liang J J, Gong D Y, et al. Fluid migration paths in the marine strata of typical structures in the western Hubei - eastern Chongqing area, China[J]. Petroleum Science, 2013, 10(1): 1-18.

《地质通报》第 39 卷第 5 期要目预告

阿拉善北部杭乌拉地区早二叠世火山岩地球化学、Nd-Hf 同位素特征及其构造意义	李润武等
东昆仑东段红山地区早三叠世火山岩的发现及地质意义	张新远等
班公湖-怒江结合带中段早白垩世花岗岩长斑岩年代学、Hf 同位素及地球化学特征	王嘉星等
藏东卡贡地区早侏罗世似斑状钾长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及地球化学特征	于涛等
新疆西昆仑黑石北湖地区巴颜喀拉山群安山质沉凝灰岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄	唐名鹰等
内蒙古锡林郭勒盟东乌珠穆沁旗万宝组孢粉组合的发现及其地质意义	韦一等
豫西焦沟正长岩锆石 U-Pb 定年、地球化学特征及地质意义	梁涛等
辽宁北部秀水盆地下白垩统义县组火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其意义	李晓海等
辽北开原地区新太古代变质深成岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及岩石地球化学特征	彭游博
诸广山岩体中段岩脉 ⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar 年代学及与铀成矿关系	蒋红安等
豫西熊耳山地区重磁场特征与深部成矿预测	王俊鹤等
四川旺苍二叠系吴家坪组铼、硒等稀散元素找矿新发现及意义	唐文春等
西天山智博铁床地球化学及同位素特征	沈立军等
东昆仑东段那更康切尔银矿 S-Pb 同位素特征与找矿模型	徐崇文等
芬兰科密铬铁矿床研究新进展	张伟波等
冰岛区域地质及矿产资源特征	蒋喆等