

宁蒭—盐源盆地泥盆系油气地质特征及勘查方向

张子亚^{1,2*}, 石砥石², 兰志勤³, 张聪², 覃英伦², 陈榕², 康海霞²

1 中国石油大学(北京)非常规油气科学技术研究院, 北京 102249

2 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100083

3 山东省煤田地质规划勘察研究院, 济南 250104

* 通信作者, zyzhang3327@163.com

收稿日期: 2020-02-18

中国地质调查局项目“滇黔桂地区上古生界海相页岩气基础地质调查”(DD2016-0178)资助

摘要 云南宁蒭地区云宁地1井首次在康滇古陆以西泥盆系钻获稳定天然气流, 取得了新区新层系油气调查重大发现。本文基于宁蒭—盐源盆地云宁地1井的系列岩心、测录井、地震以及地质地化综合实验分析, 开展泥盆系烃源岩地化特征、储层物性特征以及保存成藏等方面的综合研究, 对宁蒭—盐源盆地泥盆系油气地质条件进行了系统评价。研究结果表明: (1)云宁地1井钻遇中泥盆统大槽子组生屑泥页岩段累计厚度约130 m, 富含有机质页岩厚度大, 热演化程度适中, 具有良好的页岩气富集基础。(2)大槽子组页岩脆性矿物含量较高, 平均为63.1%, 有利于储层改造; 孔隙度为0.66%~3.3%, 微米—纳米级孔隙发育, 有机质孔、溶蚀孔、粒间孔、晶间孔、层间孔和微裂缝等均广泛分布, 具备良好的页岩气赋存集空间。(3)上覆中泥盆统碳山坪组发育礁滩相沉积, 下段生物礁灰岩孔隙度达4.91%; 原生孔隙、溶蚀孔和缝合线等均较为发育, 其中原生孔隙多为层孔虫和珊瑚等构成的生物格架孔。碳山坪组储层物性较好, 上段致密灰岩排替压力大, 封盖能力佳, 和大槽子组泥页岩构成良好的生储盖组合。综合认为, 宁蒭—盐源盆地泥盆系具备良好的常规天然气藏与页岩气藏形成条件, 是下一步勘查和攻关研究重点方向。该成果同时也为四川盆地外复杂构造区天然气勘查提供了启示和借鉴。

关键词 云南; 四川; 泥盆系; 碳山坪组; 大槽子组; 页岩气调查

Geological characteristics and exploration directions of Devonian strata in the Ninglang-Yanyuan Basin

ZHANG Ziya^{1,2}, SHI Dishu², LAN Zhiqin³, ZHANG Cong², QIN Yinglun², CHEN Rong², KANG Haixia²

1 Unconventional Petroleum Research Institute, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 Oil & Gas Survey, China Geological Survey, Beijing 100083, China

3 Shandong Provincial Research Institute of Coal Geology Planning and Exploration, Jinan 250104, China

Abstract Well Yunningdi 1 in the Ninglang area of Yunnan Province (SW China) produced a stable natural gas flow for the first time from Devonian strata in the west of the Kangdian ancient continent, which can be considered as a major progress and a great discovery in oil and gas investigation targeting new areas and sedimentary series. On the basis of integrated analysis of drill core observations, well logging interpretation, and seismic and geochemical data concerning the Well Yunningdi 1 in the

引用格式: 张子亚, 石砥石, 兰志勤, 张聪, 覃英伦, 陈榕, 康海霞. 宁蒭—盐源盆地泥盆系油气地质特征及勘查方向. 石油科学通报, 2020, 02: 161-171

ZHANG Ziya, SHI Dishu, LAN Zhiqin, ZHANG Cong, QIN Yinglun, CHEN Rong, KANG Haixia. Geological characteristics and exploration directions of Devonian strata in the Ninglang-Yanyuan Basin. Petroleum Science Bulletin, 2020, 02: 161-171. 10.3969/j.issn.2096-1693.2020.02.016

Ninglang-Yanyuan Basin, comprehensive research on geochemical characteristics of source rocks, petrophysical properties, and hydrocarbon accumulation and preservation conditions has been conducted in this current work. This, provides a systemic evaluation of the geological conditions for hydrocarbon accumulation in the Devonian strata system in the Ninglang-Yanyuan basin (SW China). The results show that: (1) The bioclastic organic-rich shales developed in the Middle Devonian Dacaozi Formation in Well Yunningdi 1 have a cumulative thickness of over 130m, and also a moderate degree of thermal evolution, suggesting an ideal material base for shale gas generation and accumulation. (2) The shale reservoirs of the Dacaozi Formation display a high content of brittle minerals with an average of 63%, which is favorable for reservoir stimulation. Besides, a relatively high porosity of 0.66%~3.3% suggests a widespread development of micro-nanoscale pores, as confirmed by FE-SEM images showing organic pores, dissolved pores, inter-particle pores, inter-crystalline pores, interlayer pores, and microfractures, which constitute important storage spaces and migration pathways for shale gas. (3) Reef-beach facies reservoirs are developed in the overlying Middle Devonian Tanshanping Formation. The lower segment is characterized by high porosity (up to approximately 4.9%) reef limestones indicating good physical reservoir properties, and also well-developed primary pores, dissolved pores and stylolites. It is noteworthy that the primary pore systems are dominated by biogenic skeleton-supported pores mainly consisting of abundant stromatoporoids and corals. The upper segment has a displacement pressure, indicating effective source-reservoir-cap assemblages in the shale reservoirs in the Dacaozi Formation. To sum up, the Devonian depositional system in the Ninglang-Yanyuan basin is suggested as a target for future exploration and investigation directions due to its good and realistic geological conditions for the development of potential conventional and unconventional natural gas reservoirs. This investigation also lends some additional and valuable insight into potential mechanisms of natural gas accumulation in complex structural belts surrounding the Sichuan Basin, and can be used as a key reference for shale reservoir evaluation in the Upper Yangtze Platform.

Keywords Yunnan; Sichuan; devonian; Tanshanping Formation; Dacaozi Formation; shale gas survey

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2020.02.016

0 引言

宁蒭—盐源盆地位于松潘—甘孜褶皱系与扬子准地台西缘的衔接部位, 属上扬子地块西缘盐源—丽江台褶带的组成部分, 西部与三江构造带相邻, 东部与康滇古陆毗连(图 1)。宁蒭—盐源盆地整体勘探程度很低, 1:20 万区调报告曾指出在云南宁蒭与四川盐边交界地区发育泥盆系油页岩^[1], 而后又在盆地的东北、东南及东部泥盆系地层内发现有沥青及油苗分布, 展现出泥盆系具有良好的油气勘探前景^[2-5]。但前期工作以野外地表调查、重磁电及二维地震勘探为主, 钻井工作很少, 且研究重点关注志留系^[6-7], 对泥盆系研究十分薄弱, 导致对宁蒭—盐源盆地泥盆系油气地质条件和资源潜力认识不清。因此, 在前人研究的基础上, 收集分析了泥盆系区域地质资料, 通过野外剖面实测、有机地化测试以及邻区钻井对比等研究方法, 优选出宁蒭—盐源盆地中泥盆统沉积有利区。结合该区部署的二维地震资料, 选择构造保存有利部位(李子河背斜)部署实施一口地质调查井云宁地 1 井, 钻获了泥盆系稳定天然气流^[8]。本文以云宁地 1 井单井评价为出发点, 开展了泥盆系目的层系烃源岩地化特征、储层物性特征以及保存成藏等方面研究, 取得了第一手较为系统的数据库资料, 分析了宁蒭—盐源盆地泥盆系油气地质条件, 成果对于四川盆地外复杂构造

区天然气勘查提供了重要启示。

1 地质背景

宁蒭—盐源盆地大地构造位置属于上扬子地块西南缘的一部分, 主要由金河—箐河断裂、小金河断裂、麦架坪断裂、稗子地—永胜断裂所围陷^[9]。区域研究表明, 宁蒭—盐源盆地是古生代的原型盆地^[10-13]。加里东期为裂谷—稳定被动大陆边缘盆地, 以升降运动为主, 未见强烈的褶皱运动; 海西期为被动大陆边缘间歇拉张阶段, 以拉张、断陷作用为主; 晚三叠世的印支运动使盆地进入前陆盆地阶段, 挤压作用导致分割宁蒭—盐源盆地的国宝山—岩风断裂开始活动; 古近纪开始褶皱造山, 喜马拉雅运动中期阶段(始新世晚期)是盆地定型期, 强烈的挤压造山运动形成了山间拗拉盆地—宁蒭—盐源盆地。区域地层对构造活动有明显的沉积响应特征, 表现为盆地基底为元古界地层, 在该基底之上, 沉积了震旦系—下寒武统、下奥陶统—下侏罗统、古近系沉积地层, 缺失中上寒武统和侏罗系中统一白垩系和新近系, 沉积地层厚 5000~10000 余米。

早泥盆世, 在盆地西部丽江阿冷初一带发育以灰岩、生物灰岩为主的碳酸盐岩台地相沉积。中泥盆世, 海侵继续扩大, 使寒武纪—早泥盆世都处于隆起的东

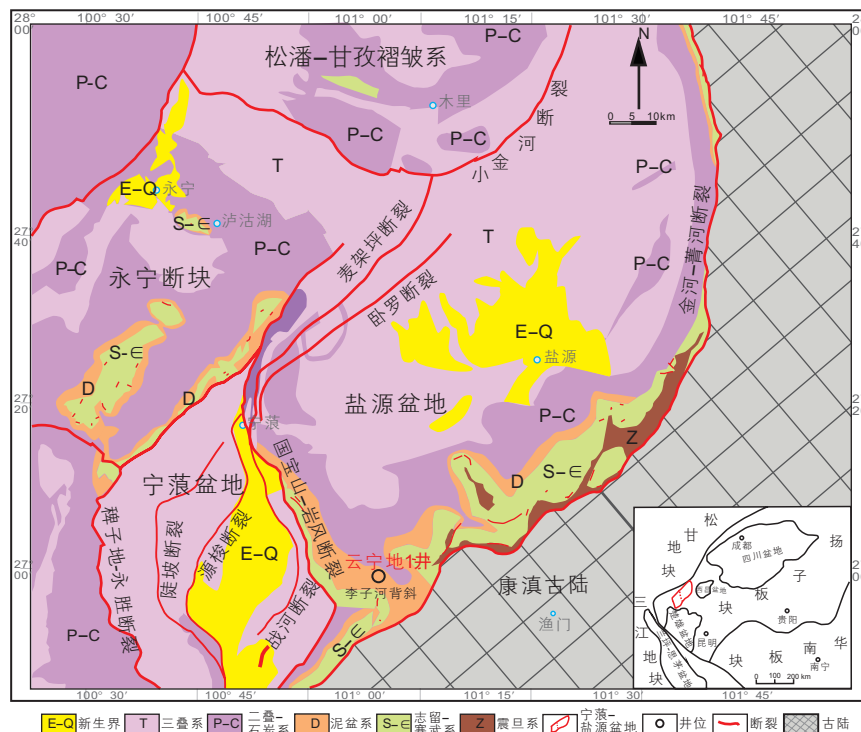


图 1 宁蒍—盐源盆地大地构造位置和云宁地 1 井位置图
 Fig. 1 Tectonic location of Ninglang-Yanyuan Basin and Well Yunyingdi 1

部华坪凸起也接受了沉积，原有的碳酸盐岩台地随海进而向东推移。晚泥盆世末，盆地逐步抬升，在盆地东侧出现台地边缘浅滩相鲕状灰岩沉积。研究区泥盆纪受北西—南东方向海侵影响，逐步形成了台地边缘礁滩相与深水陆棚相烃源岩侧向相接组合(图 2)，是油气勘查重要目标，下文主要针对中泥盆统石油地质特征开展论述。

2 宁蒍—盐源盆地泥盆系油气地质条件

2.1 云宁地 1 井钻遇地层

云宁地 1 井完钻井深 1500.68 m，开钻层位为上泥盆统烂泥箐组，完钻层位为下泥盆统大瓜坪组。依次钻遇第四系(50 m)、上泥盆统烂泥箐组(570 m)、中泥盆统碳山坪组(480 m)、中泥盆统大槽子组(350 m)、下泥盆统大瓜坪组(50.68 m 未穿)。

碳山坪组岩性大致可分为两段：上段为白云质灰岩、致密灰岩(620~830 m)，向下生物逐渐增多；下段为生物礁灰岩夹薄层泥灰岩(830~1100 m)。大槽子组岩性大致可分为三段：上段以黑色生物碎屑泥岩为主，夹少量灰黑色、深灰色泥灰岩(1100~1222 m)，向下泥质减少，灰质增多；中段以灰黑色灰岩、砂屑灰

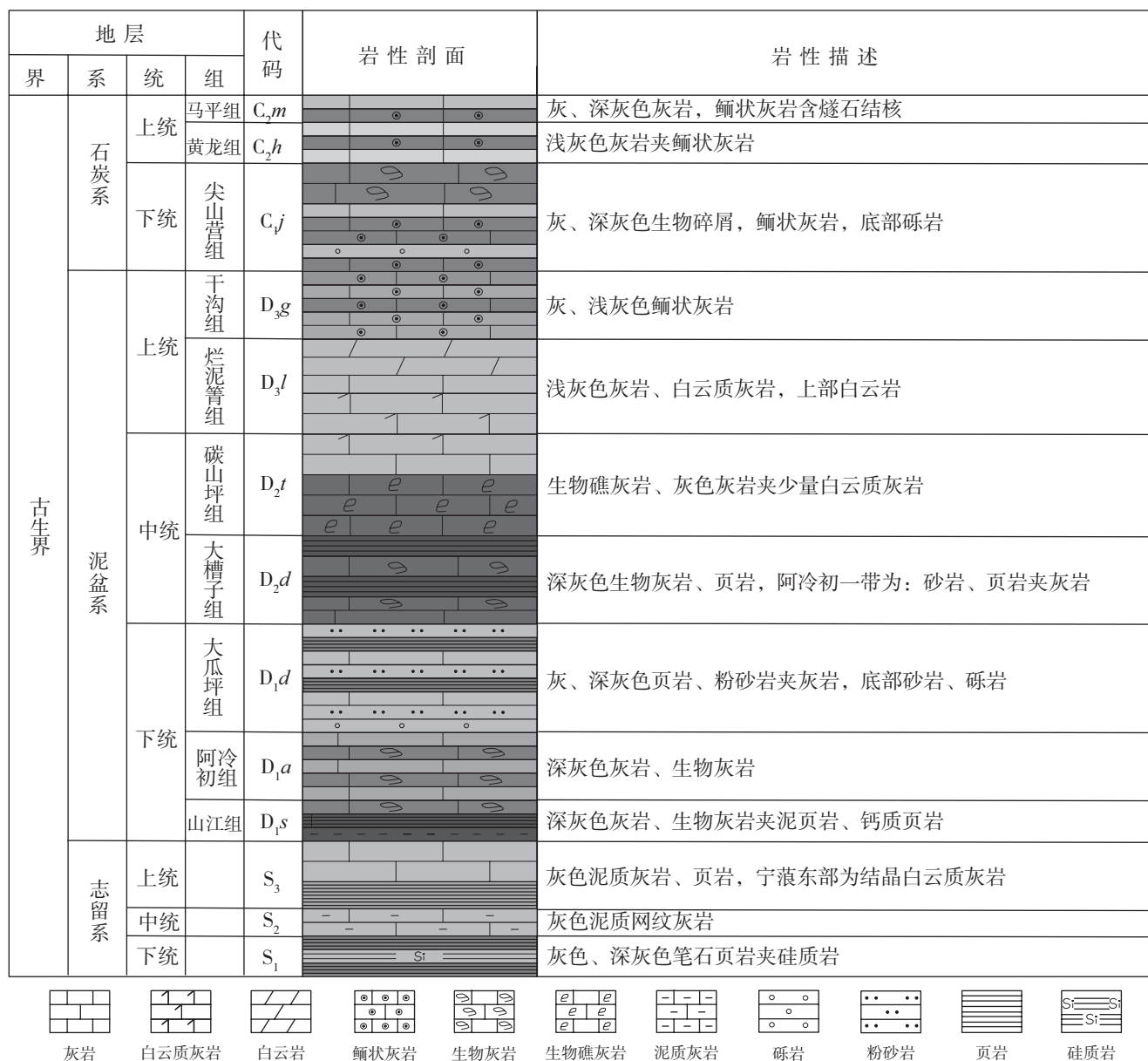
岩、粉砂岩为主(1222~1313 m)，向下灰质减少，砂质增多；下段为粉砂岩、粉砂质泥岩和泥岩薄互层(1313~1450 m)。该井气测显示丰富，目的层中泥盆统碳山坪组和大槽子组(1007~1380 m)气测值整体较高，录井全烃异常值 1.5%~11.95%，其中甲烷异常值 1.27%~10.96%，现场解析气可达 3.25 m³/t(图 3)。

2.2 页岩地球化学特征

2.2.1 有机质类型

有机质类型是评价烃源岩生烃潜力的重要参数之一，评价干酪根母质类型有两种方法：有机地球化学与有机岩石学方法，此次选取的是有机岩石学方法。

云宁地 1 井碳山坪组 5 件岩心样品干酪根显微组分鉴定检测结果表明显微组分中以腐泥组为主，含量 40%~55%，平均 48.8%；壳质组含量 26%~44%，平均 35%；镜质组含量 10%~16%，平均 14%；惰性组 1%~3%，平均 2%。干酪根类型指数(TI)49.8~58.8，平均为 54.1，干酪根类型均为 II₁ 型。大槽子组 25 件岩心样品干酪根显微组分鉴定检测结果表明，显微组分中以腐泥组为主，含量 43%~62%，平均 53%；壳质组含量 21%~41%，平均 29.12%；镜质组含量 10%~20%，平均 15.04%；惰性组 1%~5%，平均 3%。干酪根类型指数(TI)44~64，平均为 53.5，干酪根类型均为 II₁ 型。

图2 研究区泥盆系综合地层柱状图^[5](据 1:20 万丽江幅区域地质调查报告)Fig. 2 Comprehensive stratigraphic column of devonian in Ninglang-Yanyuan Basin^[5]

2.2.2 有机碳含量

一般采用有机碳含量(TOC)定量评价烃源岩优劣, 国内外大多数学者认为有效的烃源岩有机碳含量下限为 0.3%~0.5%, 对于海相烃源岩, 评价重点应该是泥岩和泥灰岩^[14]。

云宁地 1 井碳山坪组下段 16 件泥灰岩样品 TOC 在 0.10%~2.41%, 平均为 0.99%, 主体在 0.62%~1.43%, 达到好的烃源岩标准^[15]。大槽子组 87 件泥岩 TOC 在 0.37%~3.77%, 平均为 1.18%, 主体在 0.69%~1.94%, 达到中等-好的烃源岩标准^[16]。总体来看, 大槽子组上段生屑泥岩和碳山坪组下段泥灰岩 TOC 值较高, 具备良好的生烃潜力。云宁地 1 井的岩

心测试结果与前期野外露头样品测试结果在区域分布上相吻合^[17]。

2.2.3 有机质成熟度

有机质成熟度是衡量有机质向烃类转化程度的参数, 烃源岩的有机质成熟度直接关系到烃源岩的实际生烃能力, 是评价某个地区或某一烃源岩系生烃量及资源前景的重要依据, 是判断有效油气源岩的基本参数之一。云宁地 1 井大槽子组共 71 件样品镜质体反射率 R_o 值分布在 1.88%~2.62%, 平均为 2.24%; R_o 值随埋深整体上是逐渐增大的趋势。结合前期区域调查成果^[17], 总体来看, 研究区有机质热演化程度整体较高, 反映出过成熟的特征, 处于生干气阶段。

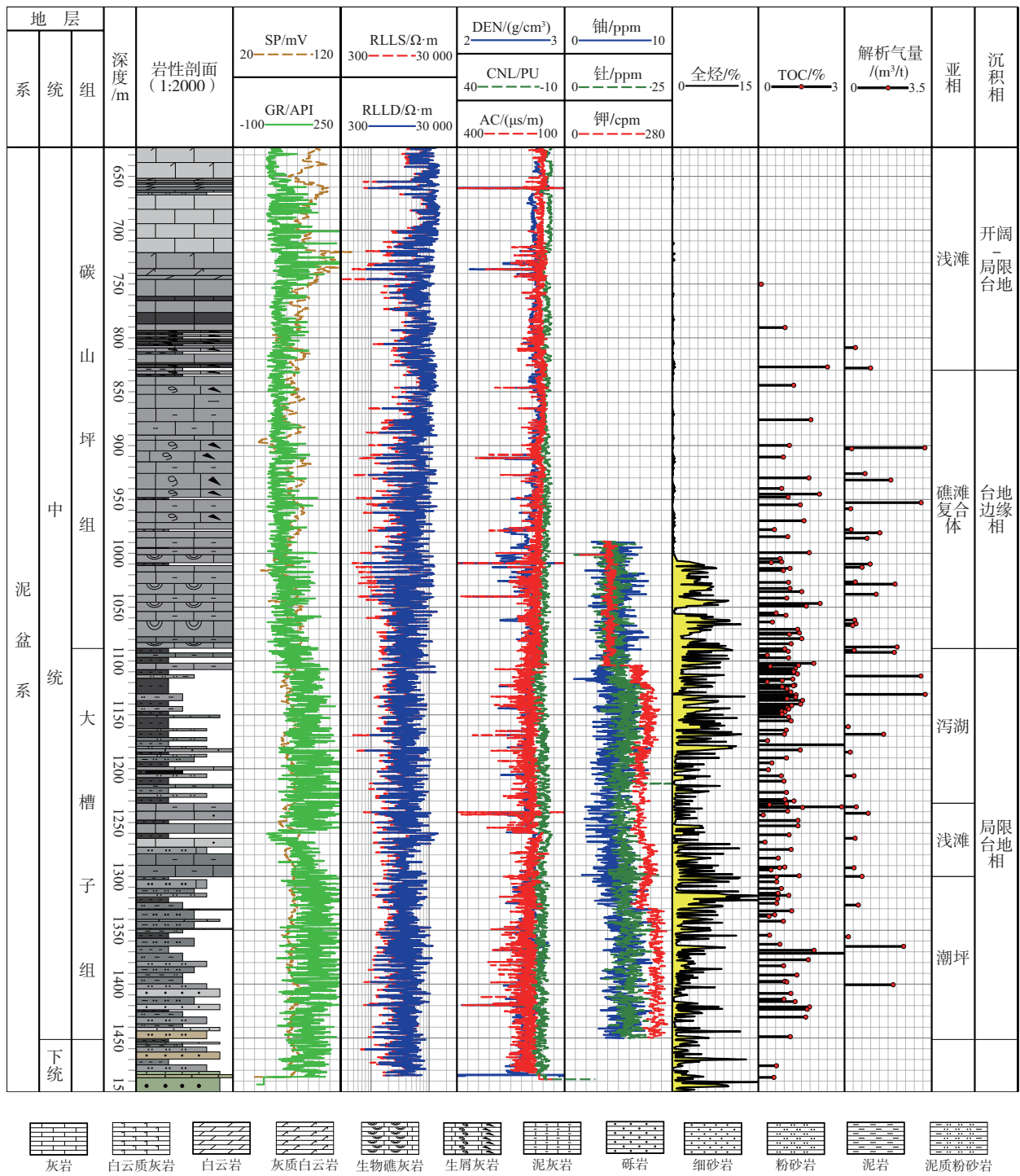


图3 云宁地1井(620~1500 m)钻井综合柱状图

Fig. 3 Comprehensive column and gas logging of Well Yunningdi 1(620~1500 m)

2.3 储层物性特征

2.3.1 碳山坪组碳酸盐岩储层特征

(1) 储集空间类型

碳酸盐岩储集空间类型丰富多样, 研究区主要为成岩作用形成的次生孔隙和由成岩、构造控制的裂缝

和孔洞。云宁地1井碳山坪组碳酸盐岩储集空间类型可分为孔、洞、缝三大类, 按照控制因素的不同将其进一步划分成原生孔隙、晶间溶孔、溶洞以及微裂缝四种类型。碳山坪组下段主要发育原生孔隙、溶蚀孔和缝合线, 其中原生孔隙主要是由层孔虫和珊瑚等构成的生物格架孔(图4)。



(a)沥青充填缝合线, 824 m; (b)溶蚀孔, 860 m; (c)层孔虫、珊瑚, 930 m; (d)珊瑚, 1063 m
图4 云宁地1井碳山坪组下段典型岩心特征

Fig. 4 Core characteristics of the Tanshanping lower section, Well Yunningdi 1

(2)物性特征

孔隙度和渗透率是评价储层物性的两个重要参数。云宁地1井碳山坪组礁灰岩段的孔隙度可达4.91%，渗透率可达13.99 mD，储层物性较好；非礁灰岩段的孔隙度和渗透率低，储层物性较差，整体为致密储层。

对48件样品实测数据分析表明，碳山坪组碳酸盐岩储层孔隙度在0.47%~4.91%，平均1.56%，为低孔储层。其中孔隙度大于2%的样品为9个，占比为15.52%；孔隙度在1%~2%的样品为26个，占比为44.83%；孔隙度小于1%的样品为13个，占比为22.41%。对42件样品实测数据分析表明，碳山坪组碳酸盐岩储层渗透率在0.000 58~13.99 mD，平均0.0094 mD，为致密储层。其中渗透率大于0.01 mD的样品为7个，占比为16.67%；渗透率在0.001~0.01 mD的样品为23个，占比54.76%；渗透率小于0.001 mD的样品数为12个，占比为28.57%。

2.3.2 大槽子组泥页岩储层特征

(1)页岩岩石矿物学特征

云宁地1井大槽子组泥页岩矿物以石英与黏土矿物为主，此外还包括方解石、白云石等碳酸盐矿物，以及长石、黄铁矿和石膏等。39件样品X衍射全岩分析结果显示，石英矿物含量分布在7%~81%，平均51.25%；长石含量较低，分布在0%~12%，平均4%，

以斜长石为主；碳酸盐矿物含量变化较大，分布在0%~62%，平均9%；黄铁矿含量0%~14%，平均4%；黏土矿物含量6%~73%，平均33%。

大槽子组上段泥页岩矿物成分以长英质矿物为主，黏土矿物次之，含少量碳酸盐矿物(图5)。脆性矿物

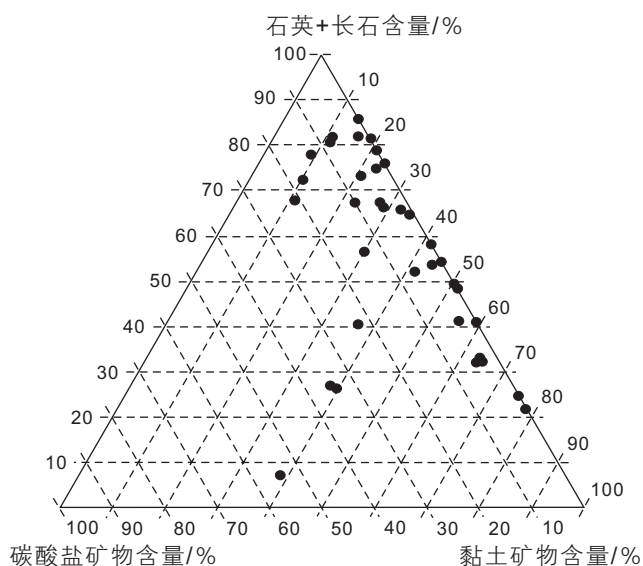


图5 云宁地1井大槽子组上段矿物组成三角图
Fig. 5 Mineral composition of the Dacaozi upper segment, Well Yunningdi 1

平均值为 63.1%，黏土矿物的平均值 32.59%，脆性矿物值高，有利于储层改造。黏土矿物成分以伊利石为主，含绿泥石、伊/蒙混层、高岭石(图 6)。伊利石含量在 80%~94%，平均 88%；绿泥石含量在 2%~11%，平均 6%；伊/蒙混层含量在 0%~9%，平均 6%，有利于页岩气富集^[18]。

(2) 页岩物性特征

目前商业开发的页岩储层要满足一定的物性条件，美国页岩储层孔隙度一般在 2%~9%，高者介于 10%~14%，国内威远—长宁地区孔隙度大多在 3.3%~8.4%^[19-21]。云宁地 1 井大槽子组 16 件样品孔隙度、渗透率测定结果表明：孔隙度在 0.66%~3.33%，平均 1.85%；渗透率在 0.0042~0.0336 mD，平均 0.0108 mD，为低孔特低渗储层。进一步对孔隙度和渗透率的分析得出，两者之间呈较强的正相关性，孔隙度越高，渗透率越大。

(3) 储集空间类型

泥页岩中发育的微观孔隙主要分为有机孔隙和无机孔隙。微观孔隙是页岩气吸附储集的重要空间，对页岩气的富集具有重要的意义，也是目前页岩气储层研究的热点^[22-27]。通过对大槽子组上段页岩进行氩离子抛光和扫描电镜试验观察表明，大槽子组泥页岩发育有机质孔、溶蚀孔、粒间孔、晶间孔、层间孔和微裂缝等多种类型(图 7)，可见微米—纳米级孔隙，具备良好的页岩气赋存储集空间。

2.4 保存条件

2.4.1 天然气组分分析

云宁地 1 井经简易测试点火成功，火焰高 0.6~1 m，

现场折算为 2000 m³/d 的稳定天然气流。根据井口收集气样的化验分析数据(表 1)，得到以下结论：①天然气组分特征显示，甲烷含量高于 99.3%，为超干气，与烃源岩 R₀ 实测值进入生干气阶段认识一致；②根据碳同位素特征，利用天然气中甲烷—乙烷同位素交互图分析，为 II_a—高成熟油型气^[28]，与干酪根类型 II₁ 型相匹配；③代入油型甲烷回归方程^[29] δ¹³C₁(‰)≈15.80lgR₀-42.201，计算出天然气热成熟度在 2.23% 左右，与实测烃源岩 R₀ 平均值 2.24% 相吻合。综合上述分析，笔者认为气体来源是中泥盆统大槽子组烃源岩。

2.4.2 盖层分析

天然气保存成藏研究是一个“实践—理论—再实践”的系统性过程，需要大量的油气钻井资料支撑。目前研究区勘查认识程度很低，根据现有资料笔者认为云宁地 1 井的天然气具有页岩气和致密气的特点，为近源成藏的岩性油气藏。该井揭示了烃源岩与储层在空间上紧密相邻，有利于油气运移和保存，且同期沉积环境中所伴生的泥页岩或致密灰岩可封闭礁体^[30]。

排替压力是指盖层最大连通孔隙具有的毛细管压力，是评价盖层封闭能力最重要的参数，排替压力与盖层封闭能力成正比^[31]。此外，孔隙度、渗透率等评价参数也是盖层封闭能力最直接的反映^[32]。选取碳山坪组上段 781 m 和 816 m 两个致密灰岩样品进行测试，得到孔隙度分别为 0.35% 和 0.75%，渗透率分别为 0.0021 mD 和 0.0011 mD，排替压力值分别为 5.72 MPa 和 5.38 MPa，证实了致密灰岩具有良好的封盖能力。

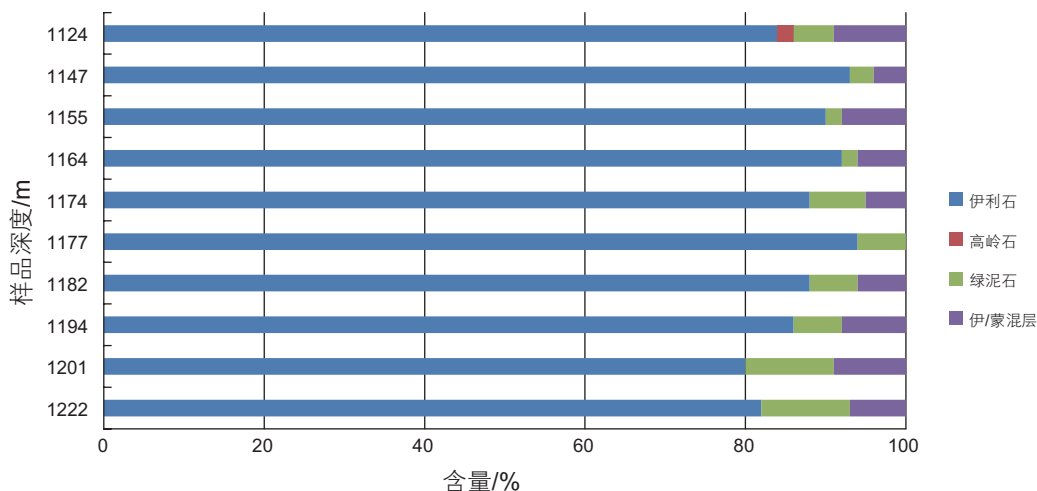
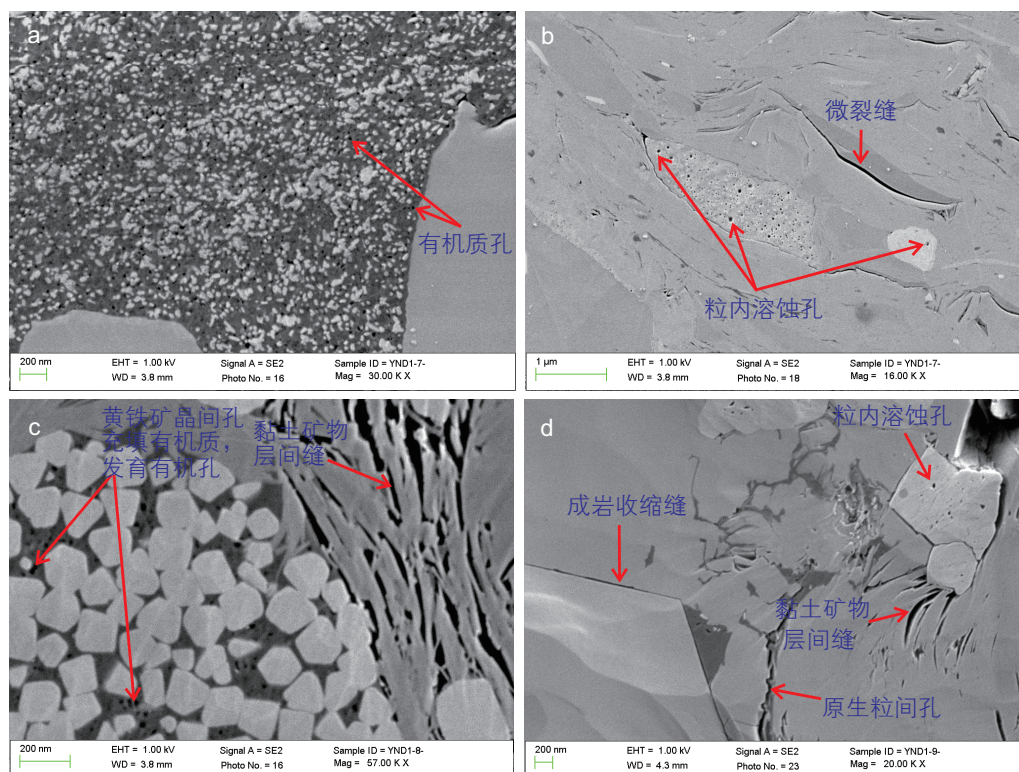


图 6 云宁地 1 井大槽子组上段 X 衍射黏土矿物分析

Fig. 6 Clay minerals of the Dacaozi upper segment measured by X-ray diffraction, Well Yunningdi 1



(a) 有机质孔, 1100 m; (b) 溶蚀孔、微裂缝, 1112 m; (c) 晶间孔、有机质孔、层间缝, 1118 m; (d) 溶蚀孔、粒间孔、层间缝、成岩缝, 1148 m

图 7 云宁地 1 井大槽子组上段泥页岩孔隙发育特征

Fig. 7 Pore development characteristics of the shale in Dacaozi upper segment, Well Yunningdi 1

表 1 云宁地 1 井井口气样分析化验数据

Table 1 Laboratory data of the gas from the drilling mouth of Well Yunningdi 1

碳同位素值 $\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$			组分含量/%		
CH_4	C_2H_6	C_3H_8	CH_4	C_2H_6	C_3H_8
-36.69	-36.12	-32.21	99.31	0.56	0.13

3 宁蒭—盐源盆地油气勘查方向

宁蒭—盐源盆地与四川盆地和黔桂地区不同, 具有独特的沉积建造和构造演化特征。四川盆地由于加里东构造运动使得盆地内大部分区域隆升剥蚀, 泥盆系仅在川西地区沿龙门山造山带有少量残留^[33]; 而黔桂地区受海西期拉张影响发育北西和北东向两组断裂, 同时由于海侵规模扩张, 泥盆系演变为台盆相间的沉积格局^[34-35]。单井综合分析表明云宁地 1 井大槽子组所在沉积相整体是近岸的浅水环境, 这与前人对临近大槽子剖面的研究结论一致^[36-37]。结合区域研究成果,

笔者认为大槽子组沉积符合威尔逊沉积相模式, 其深水区沿古海侵方向向北西扩展, 具体相带分布有待进一步深入研究。

云宁地 1 井在泥盆系钻获稳定的天然气流, 揭示了康滇古陆西缘宁蒭—盐源盆地良好的勘探潜力。电磁勘探资料解释泥盆系在区域上稳定连续沉积, 且具有一定的厚度(1000~3000 m)和分布面积(大于 10 000 km²)。过井二维地震资料显示, 黄色体为生物礁反射, 橙色体为生物丘反射, TD₁ 大致代表大槽子组底界线, TD₃ 大致代表碳山坪组顶界线, TD₁ 和 TD₃ 之间绿色拉平线为二者地层分界线, 中泥盆统广泛发育了大槽子组陆棚相烃源岩和碳山坪组台地边缘礁滩相组合(图 8)。根据宁蒭—盐源盆地区域油气地质特征, 结合云宁地 1 井单井评价认识, 研究区泥盆系具备形成常规天然气藏与页岩气藏的油气地质条件。建议优选成藏保存有利区, 向盆地内部(西北方向)甩开进行常规和非常规兼探, 部署实施油气参数井和含气性测试工程, 力争实现油气勘查重大突破。

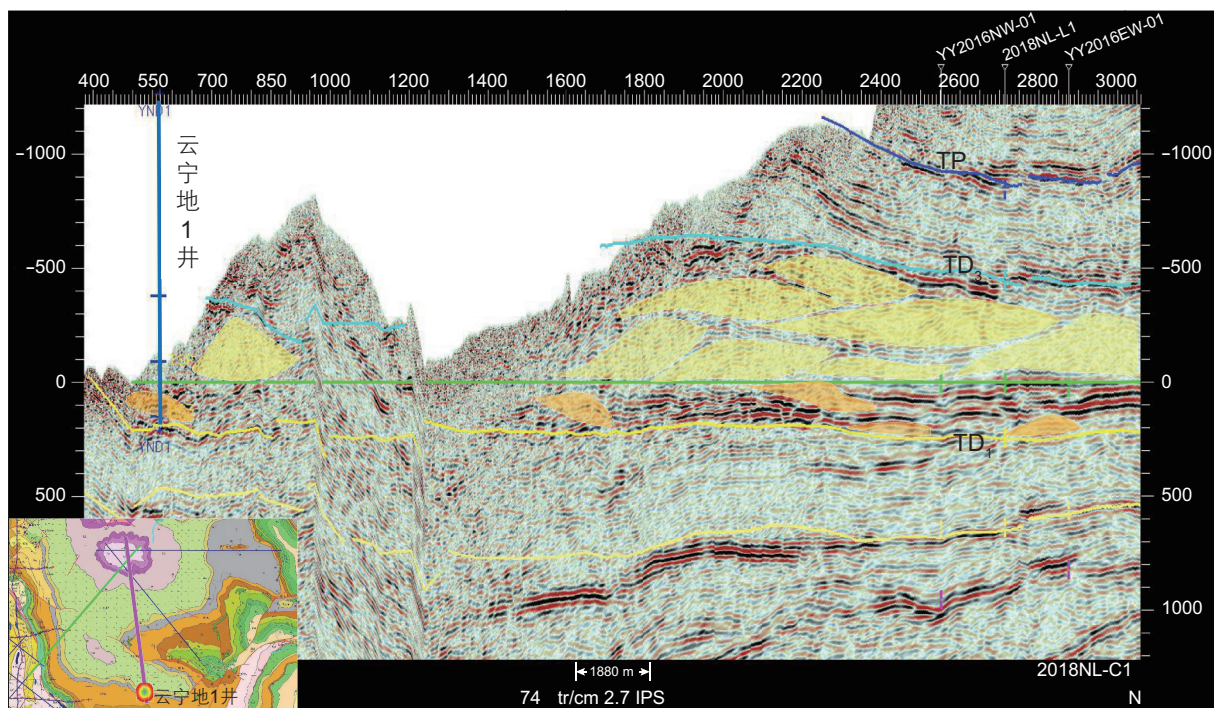


图8 过云宁地1井二维地震解释剖面

Fig. 8 Two-dimensional seismic interpretation section with Well Yunningdi 1

4 结论

(1) 泥盆系大槽子组上段富有机质页岩厚度大, 总体表现为: 有机质含量和成熟度较高, 类型偏腐泥型; 岩石脆性矿物含量高, 物性一般, 含气量较高, 具备良好的页岩气富集基础。从岩石学、有机地球化学、储层物性及含气性等页岩基本特征来看, 与志留系龙

马溪组差异较大, 亟待开展进一步深入研究。

(2) 云宁地1井首次在宁蒗—盐源盆地发现泥盆系大槽子组页岩气, 拓展了我国南方海相页岩气调查新区新层系。上覆碳山坪组广泛发育礁滩相沉积, 和大槽子组泥页岩构成良好的生储盖组合。优选成藏保存有利区, 进行常规和非常规天然气兼探, 是该区下一步勘查重点方向。

参考文献

- [1] 地质矿产部. 云南省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1982. [Ministry of geology and mineral resources. Regional geology of Yunnan province [M]. Beijing: Geology Press, 1982.]
- [2] 王振华. 宁蒗盆地油气勘探远景分析[J]. 云南地质, 2000, 19(4): 443-448. [WANG Z H. An analysis of oil-gas exploration perspective of Ninglang Basin[J]. Yunnan Geology, 2000, 19(4): 443-448.]
- [3] 董林. 宁蒗盆地油气勘探有利区分析[J]. 能源与环境, 2017, 39(2): 155-159. [DONG L. Analysis on advantageous area of oil and gas exploration in Ninglang Basin[J]. China Energy and Environmental Protection, 2017, 39(2): 155-159.]
- [4] 王正和, 邓敏, 程锦翔, 等. 康滇古陆西侧断裂及岩浆活动对油气保存条件的影响: 以盐源盆地为例[J]. 地球科学, 2018, 43(10): 3616-3624. [WANG Z H, DENG M, CHENG J X, et al. Influence of Fault and Magmatism on Oil and Gas Preservation Condition, to the West of Kangdian Ancient Continent: Taking Yanyuan Basin as an Example[J]. Earth Science, 2018, 43(10): 3616-3624.]
- [5] 任智剑, 杨飞, 苑坤, 等. 云南宁蒗地区泥盆系自然伽马能谱测量及意义[J]. 云南地质, 2018, 37(1): 84-89. [REN Z J, YANG F, YUAN K. The natural gamma energy spectrum survey and significance of Devonian in Ninglang area, Yunnan[J]. Yunnan Geology, 2018, 37(1): 84-89.]
- [6] 张茜, 王剑, 余谦, 等. 康滇古陆西侧龙马溪组黑色页岩地球化学特征及其地质意义[J]. 沉积与特提斯地质, 2017, 37(1): 97-107. [ZHANG Q, WANG J, YU Q, et al. Black shales from the Longmaxi Formation in western Xikang-Yunnan ancient land: geochemistry

- and geological implications [J]. *Sedimentary geology and Tethyan geology*, 2017, 37(1) : 97–107.]
- [7] 张茜, 王剑, 余谦, 等. 扬子地台西缘盐源盆地志留统龙马溪组黑色页岩硅质成因及沉积环境[J]. *地质论评*, 2018, 64(3) : 610–622. [ZHANG Q, WANG J, YU Q, et al. The Silicon Source and Sedimentary Environment of the Lower Silurian Longmaxi Formation in Yanyuan Basin, Western Edg of the Yangtze Platform [J]. *Geology review*, 2018, 64(3) : 610–622.]
- [8] 张子亚, 张聪, 石砥石, 等. 宁蒭—盐源地区(云宁地1井)泥盆系获天然气重大发现[J]. *中国地质*, 2019, 42(2) : 432–433. [ZHANG Z Y, ZHANG C, SHI D S, et al. Important discovery of Devonian natural gas in Yunningdi 1 Well of Ninglang-Yanyuan area[J]. *China geology*, 2019, 42(2) : 432–433.]
- [9] 朱民, 陈汉林, 周静, 等. 上扬子西南盐源盆地早三叠世物源体系及构造意义[J]. *地球科学*, 2016, 41(8) : 1309–1321. [ZHU M, CHEN H L, ZHOU J, et al. Provenance of Early Triassic in Yanyuan Basin, Upper Yangtze and Its Implication for the Tectonic Evolution[J]. *Earth Science*, 2016, 41(8) : 1309–1321.]
- [10] 葛肖虹. 川西盐源推覆构造的探讨[J]. *长春地质学院学报*, 1984(1): 36–43. [GE X H. The discussion on Yanyuan nappe in western Sichuan[J]. *Journal of Changchun Geology College*, 1984(1): 36–43.]
- [11] 李忠雄, 管士平, 钱咏臻. 扬子地台西缘宁蒭—盐源地区志留系牙形刺生物地层特征. *地球学报*, 2001, 22(3): 253–257. [LI Z X, GUAN S P, QIAN Y Z. The Silurian conodont biostratigraphical characteristics of Ninglang-Yanyuan region on the western margin of Yangtze block[J]. *Journal of earth*, 2001, 22(3): 253–257.]
- [12] 刘家铎, 张成江, 刘显凡, 等. 扬子地台西南缘成矿规律及找矿方向[M]. 北京: 地质出版社. 2004. [Metallogenic regularity and prospecting direction on the southwest margin of Yangtze block [M]. Beijing: Geology Press, 2004.]
- [13] 钟康惠, 刘肇昌, 施央, 等. 盐源—丽江构造带是新生代陆内造山带[J]. *地质学报*, 2004, 78(1) : 36–43. [ZHOU K H, LIU Z C, SHI Y, et al. Yanyuan–Lijiang Tectonic Zone: A Cenozoic Intracontinental Orogenic Belt[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78(1) : 36–43.]
- [14] 张水昌, 梁狄刚, 张大江. 关于古生界烃源岩有机质丰度的评价标准[J]. *石油勘探与开发*, 2002, 29(2): 8–12. [ZHANG S C, LIANG D G, ZHANG D J, et al. Evaluation criteria for Paleozoic effective hydrocarbon source rocks[J]. *Petroleum exploration and development*, 2002, 29(2) : 8–12.]
- [15] 秦建中, 刘宝泉, 国建英, 等. 关于碳酸盐烃源岩的评价标准[J]. *石油地质实验*, 2004, 26(3): 281–286. [QIN J Z, LIU B Q, GUO J Y, et al. Discussion on the evaluation standards of carbonate source rocks[J]. *Petroleum geology & experiment*, 2004, 26(3) : 281–286.]
- [16] 陈建平, 梁狄刚, 张水昌, 等. 中国古生界海相烃源岩生烃潜力评价标准与方法[J]. *地质学报*, 2012, 86(7) : 1132–1142. [CHEN J P, LIANG D G, ZHANG S C, et al. Evaluation criterion and methods of the hydrocarbon generation potential for China's Paleozoic marine source rocks[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(7) : 1132–1142.]
- [17] 覃英伦, 张子亚, 石砥石, 等. 宁蒭地区中泥盆统大槽子组页岩地球化学特征[J]. *东北石油大学学报*, 2020, 44(2): 11–23. [QIN Y L, ZHANG Z Y, SHI D S, et al. Geochemical characteristics of organic-rich shale in the Dacaozi Formations, Ninglang Region[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2020, 44(2): 11–23.]
- [18] 李颖莉, 蔡进功. 泥质烃源岩中蒙脱石伊利石化对页岩气赋存的影响[J]. *石油地质实验*, 2014, 36(3): 352–358. [LI Y L, CAI J G. Effect of smectite illitization On shale gas occurrence in argillaceous source rocks[J]. *Petroleum geology & experiment*, 2014, 36(3) : 352–358.]
- [19] 董大忠, 邹才能, 李建忠, 等. 页岩气资源潜力与勘探开发前景[J]. *地质通报*, 2011, 30(2/3): 324–336. [DONG D Z, ZOU C N, LI J Z, et al. Resource potential exploration and development prospect of shale gas in the whole world[J]. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(2/3) : 324–336.]
- [20] 邹才能, 董大忠, 王玉满, 等. 中国页岩气特征、挑战及前景(一)[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(6): 689–701. [ZOU C N, DONG D Z, WANG Y M, et al. Shale gas in China: characteristics, challenges and prospects(I)[J]. *Petroleum exploration and development*, 2015, 42(6) : 689–701.]
- [21] 邹才能, 董大忠, 王玉满, 等. 中国页岩气特征、挑战及前景(二)[J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(2): 166–178. [ZOU C N, DONG D Z, WANG Y M, et al. Shale gas in China: characteristics, challenges and prospects(II)[J]. *Petroleum exploration and development*, 2016, 43(2) : 166–178.]
- [22] LIU K, OSTADHASSAN M, ZHOU J, et al. Nanoscale pore structure characterization of the Bakken shale in the USA[J]. *Fuel*, 2017, 209: 567–578.
- [23] TANG X, JIANG Z, LI Z, et al. The effect of the variation in material composition on the heterogeneous pore structure of high-maturity shale of the Silurian Longmaxi formation in the southeastern Sichuan Basin, China[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015, 23: 464–473.
- [24] 姜振学, 唐相路, 李卓, 等. 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*, 2016, 23(2): 126–134. [JIANG Z X, TANG X L, LI Z, et al. 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*, 2016, 23(2): 126–134.]
- [25] 邹才能, 杨智, 陶士振, 等. 纳米油气与源储共生型油气聚集[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(1): 13–26. [ZOU C N, YANG Z, TAO S Z, et al. Nano-hydrocarbon and the accumulation in coexisting source and reservoir[J]. *Petroleum exploration and development*, 2012,

- 39(1): 13–26.]
- [26] 李廷微, 姜振学, 许辰璐, 等. 沾化凹陷沙三下亚段陆相页岩储层微—纳米孔隙结构特征[J]. 石油科学通报, 2017, 2(04): 445–456. [LI T W, JIANG Z X, XU C L, et al. Shale micro-nano pore structure characteristics in the lower third member of the continental Shahejie Formation, Zhanhua Sag[J]. Petroleum Science Bulletin, 2017, 2(04): 445–456.]
- [27] 高之业, 范毓鹏, 胡钦红, 等. 川南地区龙马溪组页岩有机质孔隙差异化发育特征及其对储集空间的影响[J]. 石油科学通报, 2020, 5(01): 1–16. [GAO Z Y, FAN Y P, HU Q H, et al. Differential development characteristics of organic matter pores and their impact on reservoir space of Longmaxi Formation shale from the south Sichuan Basin[J]. Petroleum Science Bulletin, 2020, 5(01): 1–16.]
- [28] 肖富森, 黄东, 张本健, 等. 四川盆地侏罗系沙溪庙组天然气地球化学特征及地质意义[J]. 石油学报, 2019, 40(5): 568–576, 586. [XIAO F S, HUANG D, ZHANG B J, et al. Geochemical characteristics and geological significance of natural gas in Jurassic Shaximiao Formation, Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(5): 568–576, 586.]
- [29] 戴金星, 戚厚发, 郝石生. 天然气地质学概论[M]. 北京: 石油工业出版社, 1989. [DAI J X, QI H F, HAO S S. An outline of natural gas geology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1989.]
- [30] 吕俏凤. 生物礁油气藏近源成藏模式及其对勘探的启示[J]. 海相油气地质, 2012, 17(1): 41–48. [Lü Q F. A model of source-proximal hydrocarbon accumulation of reef[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2012, 17(1): 41–48.]
- [31] 胡国艺, 汪晓波, 王义凤, 等. 中国大中型气田盖层特征[J]. 天然气地球科学, 2009, 20(2): 162–166. [HU G Y, WANG X B, WANG Y F, et al. Cap Rock Characteristics of Medium and Large Gas Fields in China[J]. Natural gas geoscience, 2009, 20(2): 162–166.]
- [32] ZHANG K, SONG Y, JIANG S, et al. Shale gas accumulation mechanism in a syncline setting based on multiple geological factors: An example of southern Sichuan and the Xiuwu Basin in the Yangtze Region[J]. Fuel, 2019, 241: 468–476.
- [33] 徐胜林, 陈洪德, 陈安清, 等. 四川盆地泥盆系一中三叠统层序格架内生储盖分布[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(2): 159–167. [XU S L, CHEN H D, CHEN A Q, et al. Distribution of source-reservoir-cap rock assemblages within the sequence framework from the Devonian to the Middle Triassic in the Sichuan Basin[J]. Petroleum exploration and development, 2011, 38(2): 159–167.]
- [34] 侯中健, 陈洪德, 田景春, 等. 层序岩相古地理编图在岩相古地理分析中的应用[J]. 成都理工学院学报, 2001, 28(4): 376–382. [HOU Z J, CHEN H D, TIAN J C, et al. The application of sequence lithofacies and paleogeography mapping to the analyses of lithofacies-paleogeography[J]. Journal of Chengdu university of technology, 2001, 28(4): 376–382.]
- [35] 张子亚, 魏家琦, 石砥石, 等. 桂中坳陷中泥盆统罗富组富有机质页岩特征及意义[J]. 石油实验地质, 2019, 41(1): 16–22. [ZHANG Z Y, WEI J Q, SHI D S, et al. Shale gas characteristics of organic-rich shale in Luofu Formation in Guizhong Depression[J]. Petroleum geology & experiment, 2019, 41(1): 16–22.]
- [36] 曹美珍, 王尚启. 论大槽子组和碳山坪组的地质时代[J]. 地层学杂志, 1989, 13(2): 119, 144–147. [CAO M Z AND WANG S Q. Geologic age study of the Dacaozi Formation and the Tanshanping Formation[J]. Journal of stratigraphy, 1989, 13(2): 119,144–147.]
- [37] 王尚启, 曹美珍. 云南宁蒗大槽子泥盆纪介形类—古足目类[J]. 微体古生物学报, 1997, 14(4): 419–441. [WANG S Q AND CAO M Z. Devonian ostracods from Dacaozi section of Ninglang, Yunnan—Palaeocopids[J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 1997, 14(4): 419–441.]

(编辑 付娟娟)