

雪峰隆起西南缘寒武系乌训组页岩气成藏地质特征与勘探潜力分析

淡永^{1,2,3}, 闫剑飞^{2,3}, 张庆玉^{1,4}, 马龙^{2,3}, 聂国权^{1,4}, 季少聪^{1,4}

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 桂林 541004; 2. 中国地质调查局成都地质调查中心, 成都 610081; 3. 自然资源部沉积盆地与油气资源重点实验室, 四川 成都 610081; 4. 自然资源部/广西岩溶动力学重点实验室, 桂林 541004)

摘要: 【研究目的】2020年, 雪峰隆起西南缘下寒武统乌训组首次发现页岩气显示, 但其成藏条件和勘探潜力未知。【研究方法】基于野外地质调查、钻探资料, 结合有机地化分析测试等手段, 对雪峰西南缘下寒武统乌训组页岩进行综合研究。【研究结果】研究表明: (1) 乌训组沉积于碳酸盐岩外缓坡相, 与川中龙王庙组为同时异相。(2) 富有机质页岩发育在乌训组中下部, 岩石组合为钙质炭质页岩夹薄层灰岩, 厚度 30~80m, 呈北东-南西狭长分布。(3) 页岩有机质含量 TOC 平均为 1%, 有机质类型为 I 型腐泥型, Ro 平均为 2.02%, 热演化程度适中。(4) 页岩脆性矿物含量在 43%~69%, 均值为 59.2%, 粘土矿物含量在 16%~37%, 均值为 28.2%, 硅质含量高, 脆性较大, 易于储层改造。(5) 页岩为低孔低渗储层, 有机质孔、晶间孔、层间孔、碳酸盐岩矿物溶孔为页岩气富集提供了储集空间, 但至少 4 期构造裂缝以及构造作用造成的页岩劈理域大大改善了页岩储集能力。【结论】综合地化、储层物性及保存条件等评价指标, 提出雪峰西南缘山前兴仁向斜东翼可作为页岩气勘探潜力区。

关键词: 寒武系; 龙王庙期; 乌训组; 外缓坡相; 富有机质页岩; 成藏地质特征; 页岩气地质调查工程; 黔南坳陷

创新点: 根据地化、储层物性及保存条件等评价, 首次提出乌训组页岩具备一定成藏条件, 雪峰隆起西南缘山前兴仁向斜东翼可作为乌训组页岩气勘探潜力区。

Geological characteristics and favorable area prediction of shale gas in Cambrian Wuxun Formation in the southwestern margin of Xuefeng uplift, China

DAN Yong^{1,2,3}, YAN Jianfei^{2,3}, ZHANG Qingyu^{1,4}, MA Long^{2,3}, NIE Guoquan^{1,4}, JI Shaocong^{1,4}

(1. Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004; 2. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081; 3. Key Laboratory of Sedimentary Basin and Oil and Gas Resources, Ministry of Natural Resources, Chengdu 610081, China; 4. Karst Dynamics Laboratory, MLR & GZAR, Guangxi, 541004, China)

Abstract: This paper is the result of shale gas geological survey engineering.

[Object] In 2020, shale gas shows were first discovered in the Lower Cambrian Wuxun Formation on the southwestern margin of the Xuefeng uplift, but its accumulation conditions and exploration potential are unknown. **[Methods]** Based on field geological survey and drilling data, combined with organic geochemical analysis, a comprehensive study of the Lower Cambrian Wuxun Formation in the southwestern margin of Xuefeng was carried out. **[Results]** The results show that: (1) The shale of the Wuxun Formation was deposited in the carbonate outer ramp facies, which is different from the Longwangmiao Formation in central Sichuan at the same time. (2) The organic-rich shale is developed in the middle and lower parts of the Wuxun Formation, and the

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20190722, DD20190723, DD20221658), 广西自然科学基金项目 (2020GXNSFAA297095, 2022GXNSFBA035454), 中国地质科学院岩溶地质研究所基本科研业务费项目 (2022003)。

作者简介: 淡永, 1986年生, 男, 副研究员, 博士, 主要从事岩溶区页岩气成藏地质研究。E-mail: dy920@qq.com.

通讯作者: 闫剑飞, 1979年生, 男, 高级工程师, 博士, 主要从事页岩气地质调查工作。E-mail: 581157@qq.com.

张庆玉, 1984年生, 男, 高级工程师, 博士, 主要从事页岩气地质调查工作。E-mail: zhangqingyu@karst.ac.cn.

rock combination is calcareous carbonaceous shale intercalated with thin limestone, with a thickness of 30–80 m, and a long and narrow distribution in the northeast-southwest. (3) The average TOC content of shale organic matter is 1%, the organic matter type is I type sapropelic type, the average R_o is 2.02%, and the degree of thermal evolution is moderate.(4) The content of brittle minerals in shale ranges from 43% to 69%, with an average value of 59.2%, and the content of clay minerals ranges from 16% to 37%, with an average value of 28.2%.Therefore, shale has high siliceous content and high brittleness, which is easy for reservoir stimulation. (5) Shale is a low-porosity and low-permeability reservoir. Organic pores, intercrystalline pores, interlayer pores, and carbonate mineral dissolved pores provide storage space for shale gas enrichment, but at least four stages of structural fractures and The shale cleavage domain caused by tectonic action greatly improves the shale storage capacity. **[Conclusion]** Comprehensive evaluation indicators such as geochemistry, reservoir physical properties and preservation conditions suggest that the eastern flank of the Xingren syncline in the southwestern margin of Xuefeng can be a favorable area for shale gas exploration.

Key words: Cambrian, Longwangmiao period, Wuxun Formation, Carbonate outer ramp facies, Organic-rich shale, Accumulation geological characteristics, Shale gas geological survey engineering, Qiannan depression

Highlights : Comprehensive evaluation of geochemical, reservoir physical properties and preservation conditions, etc., it is proposed for the first time that the shale of the Wuxun Formation has certain accumulation conditions, and the eastern flank of the Xingren syncline in the southwestern margin of the Xuefeng uplift can be used as a potential area for shale gas exploration in the Wuxun Formation .

About the first author: DAN Yong, male, born in 1986, associate professor, engaged in shale gas geological survey; E-mail: dy920@qq.com.

About the corresponding author: YAN Jianfei, male, born in 1979, senior engineer, engaged in shale gas geological survey; E-mail: 581157@qq.com. ZHANG Qingyu, male, born in 1984, senior engineer, engaged in shale gas geological survey; E-mail: zhangqingyu@mail.cgs.gov.cn.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey (No.DD20190722, No.DD20190723, No.DD20221658), Guangxi Natural Science Foundation of China (2020GXNSFAA297095, 2022GXNSFBA035454), Basic research expenses of Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences (2022003).

1 引言

页岩气属于非常规能源，北美开发页岩气取得了巨大成功（Curtis,2002; Bowker,2007; Hickey et al.,2007; Loucks et al., 2007,2009）。页岩气也是低碳清洁能源，发展页岩气符合我国低碳经济发展的需求(邹才能等，2021)。2020年中国页岩气年产量超过200亿方，页岩气也成为我国天然气增储上产的绝对主力军，已形成涪陵、长宁、威远、昭通四大产气区(Zhai et al., 2018; 邹才能等，2021; 郭旭升等，2022)。但产气层系主要为奥陶系五峰组-志留系龙马溪组，产气范围集中在四川盆地及其毗邻南缘地区，页岩气产气层组及盆地均单一问题突出，戴金星等（2020）指出若要使页岩气在中国天然气工业中发挥更大作用，必须在更多盆地寻找和发现更多页岩气层组。

雪峰古隆起是中上扬子地区重要的构造单元，围绕雪峰古隆起边缘的页岩气勘探和研究从未停歇，许多学者对该区的页岩气前景充满了期待（张金川等，2008; 崔敏等，2009; 聂海宽等，2011; 汪正江等，2012; 刘家洪等，2012; 冷济高等,2016; 彭中勤等,2019; 苗凤彬等，2020; Ge et al., 2020; 淡永等，2021; 刘安等，2021; 马龙等，2022），尤其是翟刚毅等（2017）在总结黄陵古隆起宜昌地区页岩气富集地质特征后认为古隆起周缘具有埋藏深度

适中、抬升较早、构造变形较弱的特点，有利于页岩气的富集和保存。因此尽管至今雪峰古隆起周缘未取得勘探突破，但这些地区已成为了勘探热点地区，中国地质调查局、油企近年不断投入相关工作(Li et al., 2022)。2020年我们通过露头调查和钻探首次在雪峰隆起西南缘早寒武世龙王庙期乌训组发现炭质页岩，并见良好页岩气显示，获得雪峰隆起周缘页岩气勘探的新发现(淡永等，2021)。

但以往该区主要对下寒武统牛蹄塘组页岩研究较多，对下寒武统乌训组研究和认识较薄弱，富有机质段发育位置、厚度、沉积环境及有机地化特征、生气、储气能力未知，其勘探潜力如何，需进一步进行研究和评价。因此本文就围绕新发现的乌训组展开区域剖面调查、钻井岩芯观察和采样测试分析，以此摸清乌训组成藏地质条件和资源潜力，支撑该区下一步页岩气勘探。

2 地质背景

雪峰古隆起位于扬子板块的东南缘，属于江南弧形构造带的西段，总体呈向北西凸出的弧形构造带(彭中勤等，2019)，本次研究区位于雪峰隆起西南缘与黔南坳陷接触带(图1)。该区沉积演化可划分为早震旦世-中奥陶世的斜坡-陆棚-盆地相沉积阶段；晚奥陶世-早志留世受加里东运动(广西运动)影响(陈旭等，2014)，研究区经历短期沉积间断；中泥盆世-中三叠纪持续沉降；中侏罗世至早白垩世，受印支运动影响强烈改造抬升；中白垩世，受燕山运动影响经历短暂沉降；晚白垩世至今，又持续抬升。受多期抬升剥蚀，现今雪峰古隆起元古界大量出露，而往西坳陷区出露地层逐渐变新。

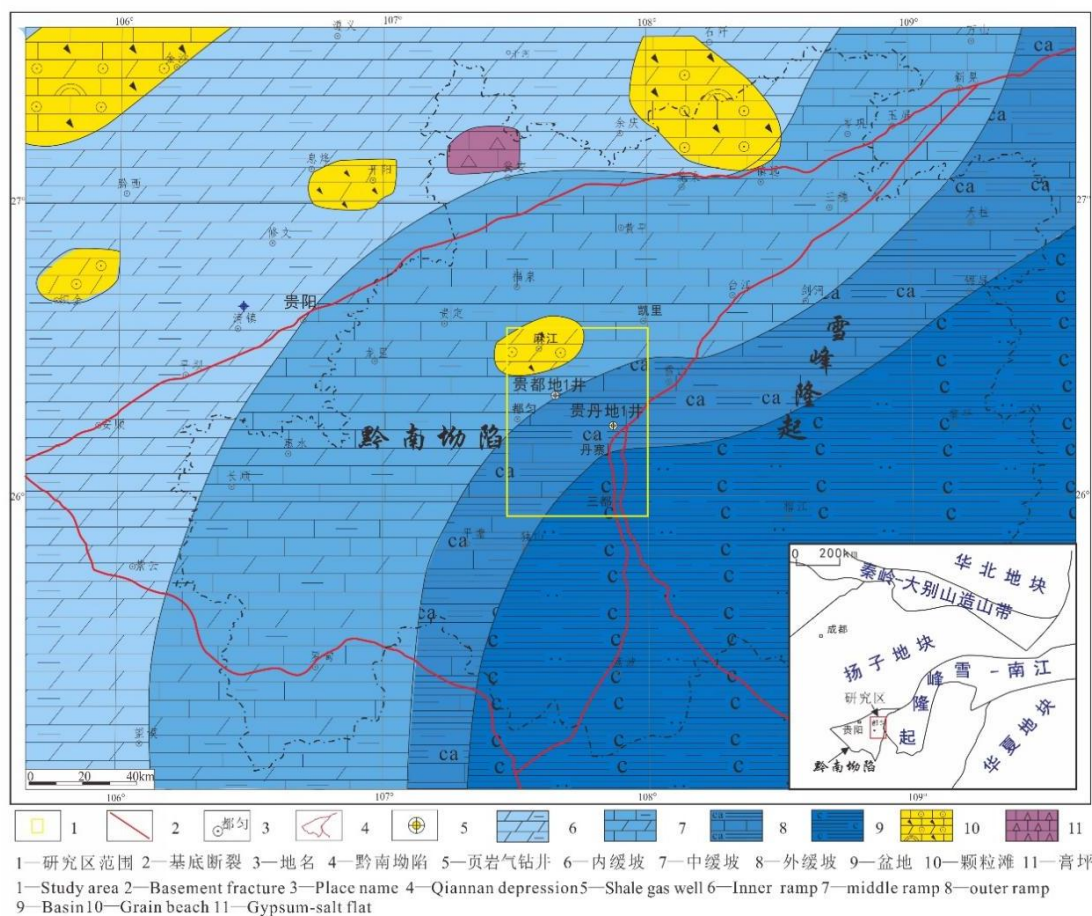


图1 雪峰隆起西南缘早寒武世龙王庙期沉积相与研究区位置图(郑斌嵩, 2016)
 Fig. 1 Sedimentary facies during Early Cambrian Longwangmiao period and location map of the study area on the southwestern margin of the Xuefeng uplift (Zheng , 2016)

根据贵州省区域地质志（贵州省地质调查院，2013）乌训组是发育于早寒武世龙王庙期（本文按寒武系三统划分方案，在新的寒武系四统划分方案中乌训组为第二世晚期沉积地层）一套外缓坡相地层（表1，图1），岩性为浅灰、灰绿色页岩、钙质页岩及砂质页岩及灰色薄层灰岩，含过渡型三叶虫 *Arthricocephalus*, *Changaspis*, *Protoryctocephalus* 及 *Redlichia* 等，区域上主要分布于北东-南西台江-丹寨狭长地区，受外缓坡相控制明显（王剑等，1990;郑斌嵩，2016）（图1）。区域岩性及厚度变化较大，厚40—400余米，由丹寨向北厚度渐增，铜仁一带以薄层灰岩为主，常见包卷层理、滑塌构造、同生挠曲及砾屑灰岩，厚400m；丹寨向南以钙质页岩为主含炭质，厚205m，至三都逐渐相变为盆地相渣拉沟组（表1，图1），往西相变为中缓坡相清虚洞组白云岩（表1，图1）（贵州省地质调查院，2013）。2020年在丹寨县城北东实施的贵丹地1井揭示了乌训组具有良好含气性，从乌训组中部到底部气测异常，且在底部节流点火成功，展示了乌训组具有一定勘探潜力（淡永等，2021）（图2）。

表1 寒武系乌训组地层对比（贵州省地质调查院，2013）

Table 1 Stratigraphic comparison of the Cambrian Wuxun Formation (Guizhou Geological Survey Institute, 2013)

年代地层						岩石地层						
贵州省区域地质志(2013)			本文采用			川西-黔北地区			黔南-黔东南地区			
系	统	代号	阶	统	代号	内缓坡		中缓坡	外缓坡	盆地		
						川西-川中	川东-黔北	江口-都匀小区	台江-丹寨小区	三都小区		
寒武系	第三统	€ ₃	台江阶	中统	€ ₂	毛庄阶	陡坡寺组	高台组		凯里组	都柳江组	
	第二统	€ ₂	都匀阶	下统	€ ₁	龙王庙阶	龙王庙组	清虚洞组		乌训组		渣拉沟组
						沧浪铺阶	沧浪铺组	金顶山组	杷榔组			
			南皋阶			明心寺组	变马冲组					
						笋竹寺阶	笋竹寺组	九门冲组				
	纽芬兰统	€ ₁	梅树村阶	梅树村阶	灯影组					老堡组		
		晋宁阶										

3 乌训组页岩气成藏地质特征

3.1 乌训组中下部富有机质页岩段垂向发育特征与岩石组合

贵丹地1井揭示乌训组总厚度约318m，但大多数页岩有机碳含量较低，具有气测异常的富有机质段主要分布于乌训组中下部井深605~635m和700~751m，厚度81m（图2）。

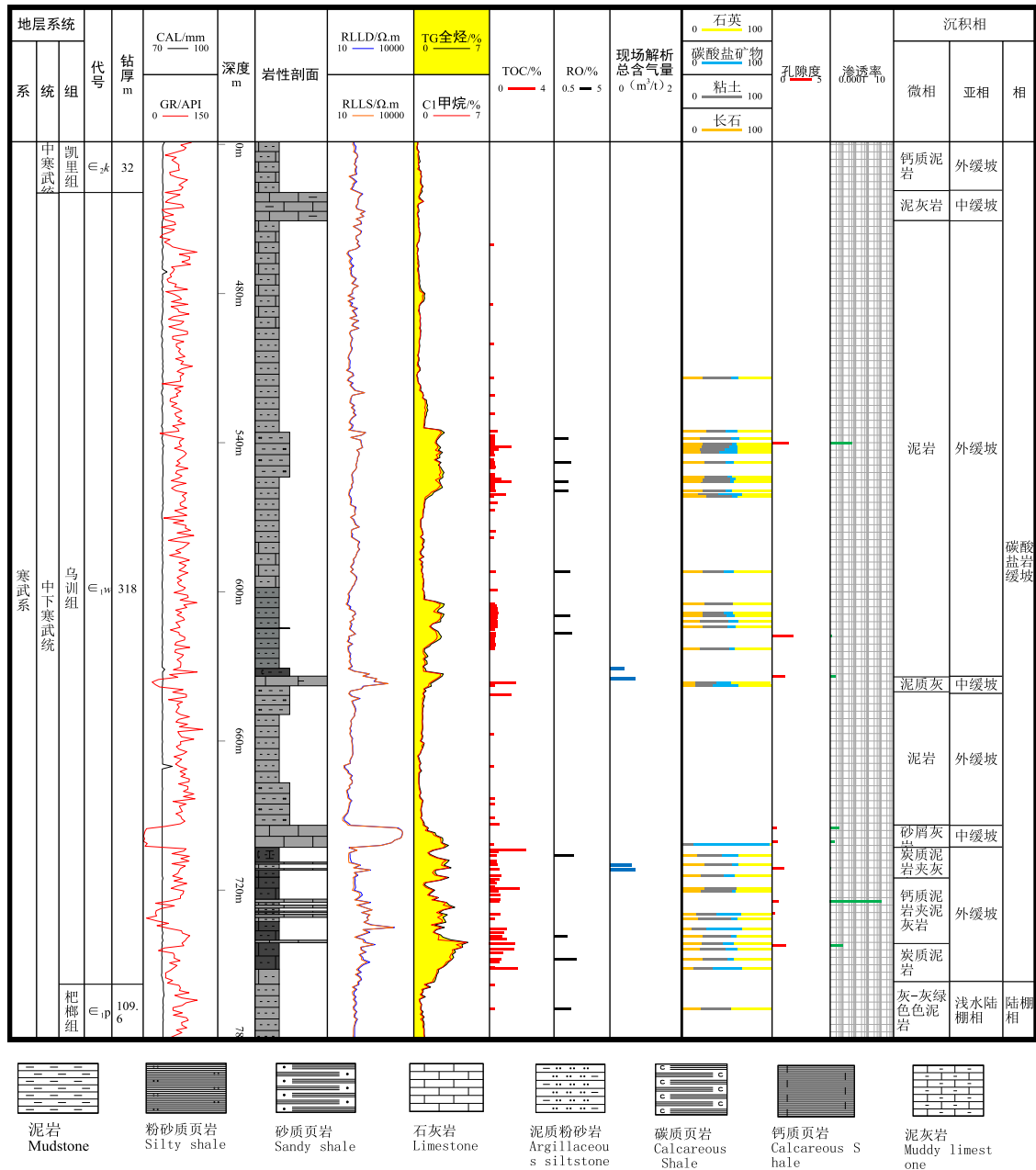


图 2 贵丹地 1 井中下寒武统乌训组页岩气成藏地质综合柱状图

Fig. 2 Comprehensive column map of shale gas accumulation geology in the middle-Lower Cambrian Wuxun Formation in Well Guidandi 1

富有机质页岩段主要为深灰色钙质泥岩、泥岩、灰黑色钙质炭质泥岩夹灰色薄层结晶灰岩、砂屑灰岩，整体上页岩中具有较高的钙含量。泥岩在岩芯、薄片可见纹层状、粒序层理、包卷构造以及风暴砾石等沉积构造，还可见海绵骨针、放射虫等较深水生物化石(图 3)，反应了具有浊积沉积的外缓坡相沉积。根据 X 全岩矿物实验分析测试结果(图 2, 图 4)，贵丹地 1 井乌训组页岩石英类矿物(石英+长石)含量在 43%-69%，均值为 59.2% (去除中部 701.7m 灰岩异常点)；粘土矿物含量在 16%-37%，均值为 28.2% (图 4)。岩石中整体脆性矿物高，有利于后期压裂改造。

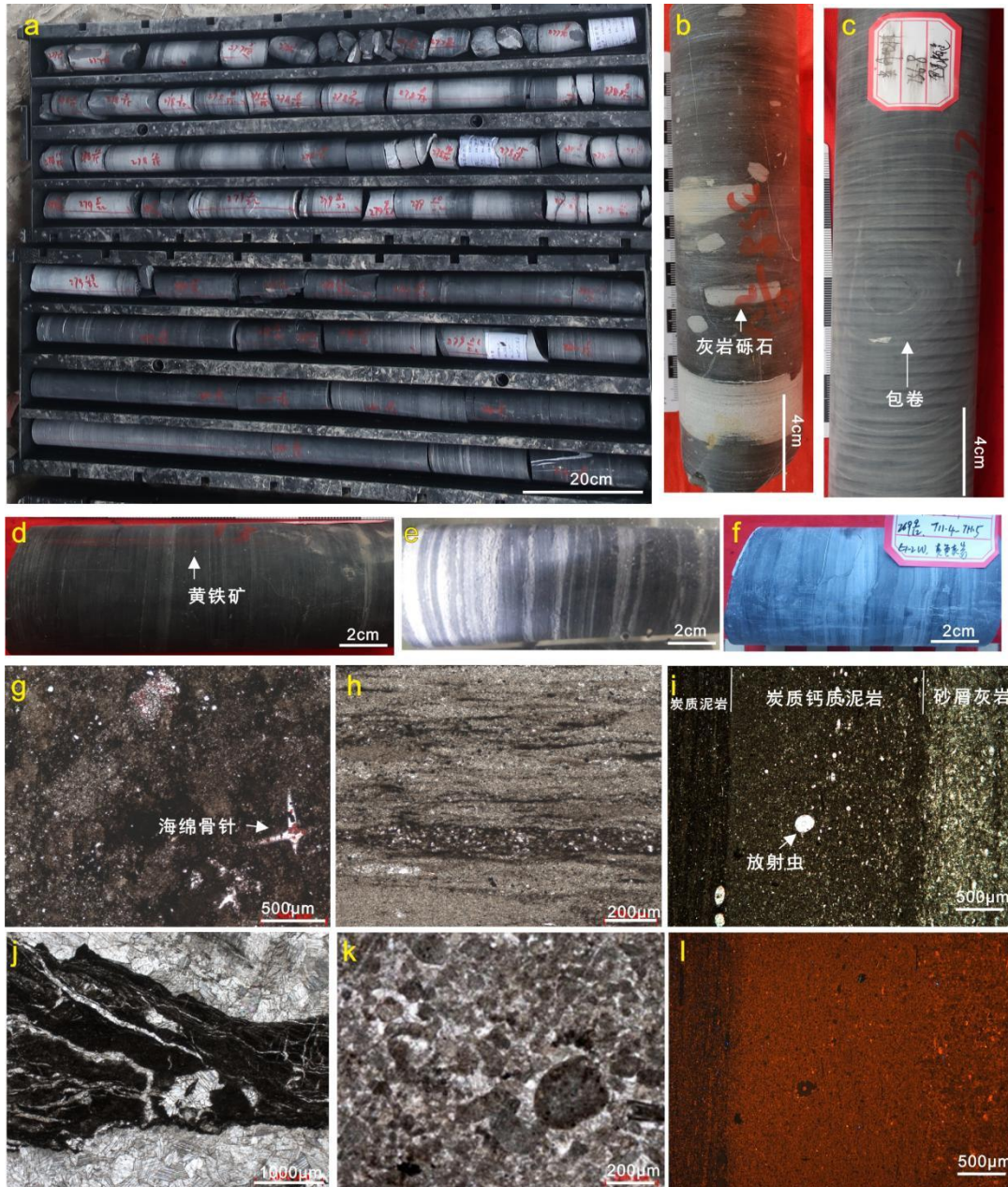


图3 贵丹地1井乌训组富有机质段岩石学特征

a.灰黑色炭质页岩与灰色薄层灰岩 728~736m;b.黑色炭质页岩中见风暴灰岩砾石,632.6m,镜下(g)可见海绵骨针化石;c.深灰色泥岩中包卷构造,756.8m;d.灰黑色炭质页岩,见黄铁矿,742.6m;e.纹层状泥岩,沿纹层出气,h为e镜下照片,可见有机质,710.4m;f.条带状灰岩,711.4m;i为镜下照片从左至右黑色泥岩-钙质泥岩-砂屑灰岩呈粒序层理,见放射虫化石,l为i的阴极发光;j.为粗晶灰岩,混有黑色炭质泥岩条带,723.5m;k.为砂屑灰岩,711.5m.

Fig. 3 Petrological characteristics of the organic-rich member of the Wuxun Formation in Well Guidandi 1

a. Gray-black carbonaceous shale and gray thin-layered limestone 728~736m; b. Storm limestone gravel, 632.6m in black carbonaceous shale, sponge bone spicules fossils can be seen under microscope (g); c. Dark gray Mudstone encapsulated structure, 756.8m; d. Gray-black carbonaceous shale, see pyrite, 742.6m; e. Laminated mudstone, gas venting along the lamina, h is the photo of e, organic matter can be seen, 710.4m; f. Banded limestone, 711.4m, i is the photo under the microscope from left to right black mudstone-calcareous mudstone-sand clastic limestone shows grain sequence bedding, see radiolarian fossils, l is the cathodoluminescence of i; j. is coarse crystalline limestone mixed with black carbonaceous mudstone bands, 723.5m; k. is sandy limestone, 711.5m

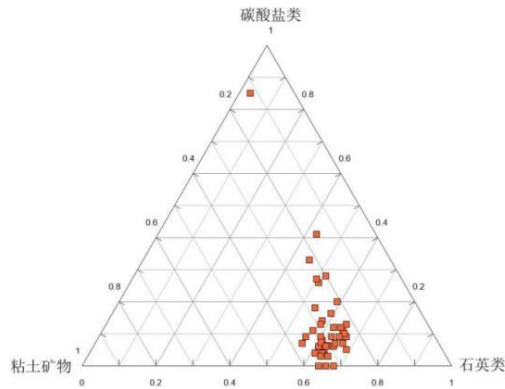


图4 贵丹地1井乌训组全岩矿物三角图

Fig. 4 Mineral composition of the whole rock of Wuxun Formation in Well Guidandi 1

3.2 沉积分布特征

通过与相邻井和野外剖面对比发现，乌训组富有机质页岩在都匀亮甲山、丹寨扬武、翻仰地表剖面也发育，厚度在30~80m（图5，图6）。

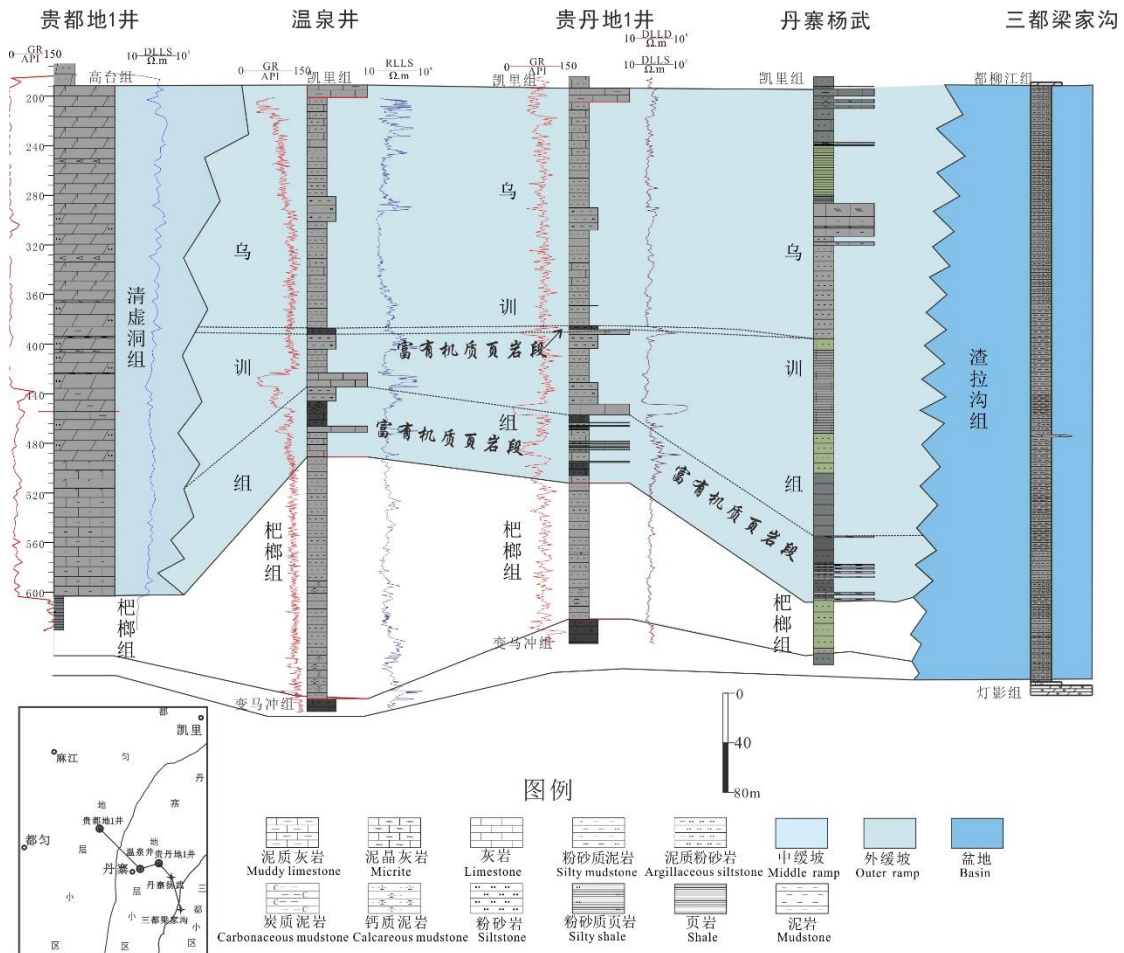


图5 雪峰隆起西南缘乌训组富有机质页岩沉积地层对比图

Fig. 5 Comparison of sedimentary strata of the organic-rich shale in the Wuxun Formation in the southwestern margin of the Xuefeng uplift

区域上乌训组下部富有机质页岩段分布较稳定，厚度约50m，中部富有机质段相对较薄，分布不稳定。但整体上富有机质页岩主要分布在施洞口断层以东区域，根据区域多条剖面对比以及郑斌嵩（2016）等人前期研究（图1），发育宽度在20~30km呈北东-南西向条带内

展布（图6）；图3显示富有机质页岩的发育与快速海侵水体变深有关，同时伴随有风暴带来钙屑浊流沉积。王剑等（2009）在研究中国南方早寒武世龙王庙期沉积相时认为扬子地区属于碳酸盐缓坡沉积，四川盆地川西-黔北属于内缓坡沉积，发育蒸发岩以及鲕粒云岩；黔中地区为中缓坡沉积为一套白云岩为主的沉积，夹有鲕粒云岩；到本区主要为外缓坡沉积为泥质灰岩、钙质泥岩、黑色页岩岩石组合（表1）。中缓坡与外缓坡边界可以根据钻井确定，施洞口断层以西钻井，如贵都地1井不再发育乌训组富有机质页岩，为一套白云岩，说明施洞口断层当时为同沉积断层，导致扬子地区龙王庙期碳酸盐岩缓坡在断层以东突然变陡，沉积了贵丹地1井的浊流的钙质泥岩和黑色页岩等，因此早寒武世龙王庙期扬子地区属于远端变陡缓坡沉积类型，而乌训组为陡坡以下外缓坡相沉积物，分布受外缓坡相控制。乌训组富有机质页岩往南东三都一带相变为盆地相渣拉沟组黑色页岩，本文不再将其归为乌训组研究（图6）。埋深方面，根据钻井实钻、区域构造、地层产状预测，乌训组富有机质页岩在研究区埋深在0~3500m 适宜于开采（图6）。

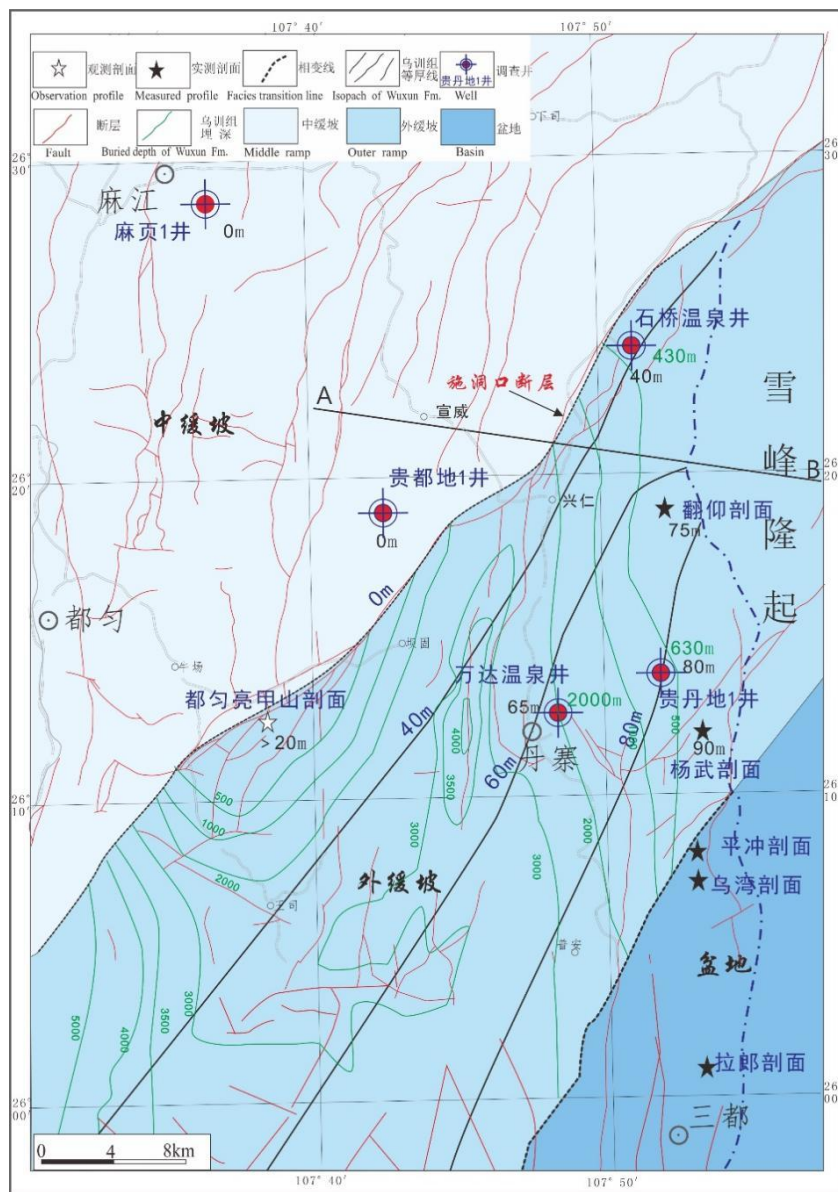


图6 雪峰隆起西南缘乌训组富有机质页岩沉积分布图

Fig. 6. Sedimentary distribution of organic-rich shale in the Wuxun Formation in the southwestern margin of the Xuefeng uplift

3.3 储层物性特征

页岩孔隙度与渗透率是页岩内储集空间与渗流性能的定量表征,一定程度上决定着页岩储层含气性优劣(张金川等,2008)。根据贵丹地1井乌训组3个页岩样品的孔隙度、渗透率测试分析资料表明(表2):乌训组页岩孔隙度在1.13-1.86%,渗透率在 $0.00023-0.0049 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间,乌训组页岩的孔隙度和渗透率较小,属于低孔低渗储层。由于乌训组页岩中夹层灰岩也有较好含气显示,因此选取9个灰岩样品的孔隙度、渗透率测试表明(表2):乌训组灰岩孔隙度在0.29-1.22%,平均0.66%。渗透率方面,9个样品的渗透率在 $0.0000065-1.16 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间,8个样品低于 $0.0005252 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,但受裂缝影响,7号样可以达到 $1.16 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,综上所述,乌训组灰岩的基质孔隙度和渗透性较小,属于低孔低渗储层,灰岩中较好含气显示可能与裂缝发育有关。

表2 贵丹地1井乌训组物性特征

Table 2 Physical properties of the Wuxun Formation in Well Guidandi 1

序号	地层	深度(m)	岩性	孔隙度(%)	渗透率($10^{-3} \mu\text{m}^2$)
D1KS-1	乌训组	540.4	深灰色泥岩	1.47	0.0049695
D1KS-2	乌训组	617.9	灰黑色泥岩	1.86	0.0001296
D1KS-3	乌训组	633.9	灰黑色含炭泥岩	1.13	0.0002387
D1KS-4	乌训组	695.0	灰色灰岩	0.41	0.0005252
D1KS-5	乌训组	700.4	灰色灰岩	0.49	0.0001984
D1KS-6	乌训组	711.4	灰色灰岩	1.03	0.0001047
D1KS-7	乌训组	724.7	灰色灰岩	0.54	1.1600000
D1KS-8	乌训组	729.4	灰色灰岩	0.29	0.0000065
D1KS-9	乌训组	742.2	灰色灰岩	1.22	0.0009147

为进一步了解乌训组页岩发育的孔隙类型、孔径大小、孔隙微观结构和发育情况,利用场发射扫描电镜二次电子成像技术、铸体薄片、阴极发光等对贵丹地1井乌训组样品进行了系统的观察后发现,页岩中主要发育了5种储集空间类型,即粘土矿物层间孔隙、溶蚀孔、粒间/晶间孔、有机质孔、微裂缝(图7)。

(1) 粘土矿物层间孔隙:乌训组页岩中一般呈纹层状,粘土矿物集合体间层间孔隙发育,可有效改善储层(图7a、b)。其形成是随着地层埋深增加、地温增高和地层水逐渐变为碱性,粘土矿物发生脱水转化而析出大量的层间水,在层间形成微孔隙。层状孔隙宽一般小于 $1 \sim 2 \mu\text{m}$,连通性较好。

(2) 溶蚀孔:为成岩后生作用的增强,当成岩流体的化学性质与岩石中各组分不能达到一种化学平衡时,常常发生不稳定矿物的溶蚀作用多分布于矿物晶粒内部与晶粒间,由长石、碳酸盐矿物(方解石、白云石)等溶蚀所形成,(图7c、d),乌训组页岩钙质含量较高,碳酸盐矿物溶孔的发育有效增加了储层储集性。

(3) 粒间/晶间孔:页岩粘土矿物集合体内不同晶粒间或黄铁矿微球团晶粒之间常存在一些晶间孔,其大小与形态受矿物晶粒排列方式控制(图7e、f),大小 $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 。

(4) 有机质孔:多形成于有机质热演化与生排烃过程中,对泥页岩孔隙度具有一定贡献(马中良等,2017),研究区乌训组页岩有机质含量与热演化程度普遍较高,受其影响,有机质孔隙较为发育,多呈球粒结构,孔径以纳米级为主,少量达到微米级,孔隙载体主要为沥青质体,并与石英、黄铁矿等矿物质共生,呈条带状、散块状分布,有机孔间具有一定连通性,有储气及向有机质外的孔隙中运移气体的作用(图7g、h、i)。

(5) 裂缝:为了更准确还原贵丹地1井多期构造作用下裂缝发育期次,主要选择钙质页岩进行分析。由于脆性较高,每期构造作用都有裂缝产生,且易被方解石充填,因此钙质页岩中裂缝充填物可以很好记录当地构造活动期次,选用阴极发光对裂缝充填方解石期次进

行识别，识别发现乌训组至少存在 4 期裂缝（图 7j、k）。页岩受多期构造影响，会对应形成形变区域或劈理域。岩石劈理域内大量有机质是以几纳米至几十纳米的极微小颗粒在粘土矿物条带中出现，在纳米尺度上与粘土矿物充分混合。大量有机质与粘土颗粒的充分混合，形成了大量的纳米尺度的颗粒接触边界，这意味着在有机质与粘土矿物颗粒间搭构出了大量的纳米级的孔隙。有机质与粘土矿物颗粒接触带上同时发育了大量的微裂缝，这些微裂缝一般几十纳米宽，延伸几十纳米，且裂缝起身与劈理条带方向基本一致，立体上不同的层片通过这些微裂缝或有机质条带连接在一起，组成一个三维空间的连通的孔隙网络，大大增加了裂缝的孔隙空间与基质比表面积，加之乌训组内页岩夹的薄层灰岩中裂缝发育，更是增加了储集空间（图 7l），大量游离的页岩气进入裂缝中保存，这也是乌训组页岩气测显示较高的一个重要因素。

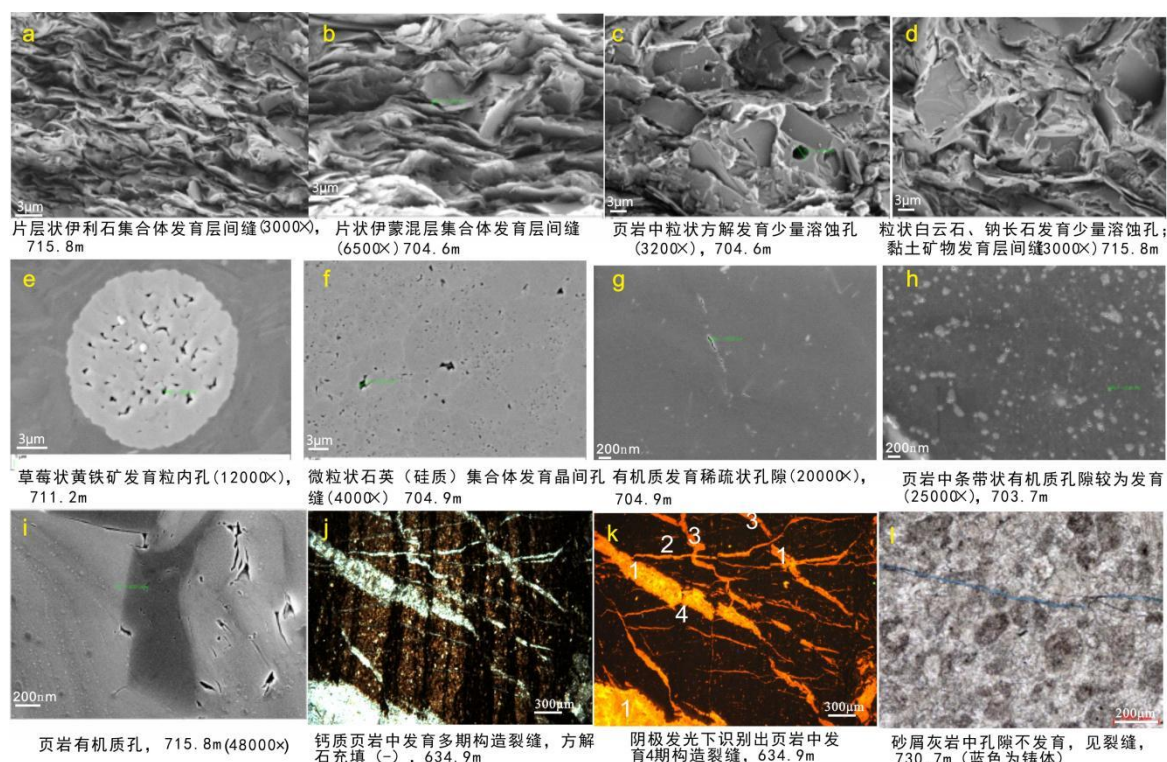


图 7 贵丹地 1 井乌训组主要微观储集空间类型

Fig. 7 Microscopic reservoir space types of Wuxun Formation in Well Guidandi 1

4 页岩有机地球化学特征

4.1 有机质丰度

有机质丰度是指单位质量岩石内所含有机质的数量。在其它条件相近的前提下，岩石中原始有机质含量（丰度）越高，其生烃能力越强(张金川等，2008，聂海宽等，2011；胡建芳等，2017)。根据贵丹 1 井乌训组 TOC 含量测试分析表明（图 2、图 8），在送 99 个样品中，TOC 含量介于 0.19%~2.25%，平均含量为 0.53%，其中 TOC 大于 2%的样品为 1 个（图 8a）；TOC 大于 1.5%，小于 2%的样品为 4 个；TOC 大于 1%小于 1.5%的样品为 7 个；TOC 小于 1%大于 0.5%的样品为 24 个，<0.5%的样品为 64 个。但 630~650m，702~751m 两段富有机质页岩段 TOC 较高平均值达到 1%，属于中等-好烃源岩（蔡勋育等，2015）。

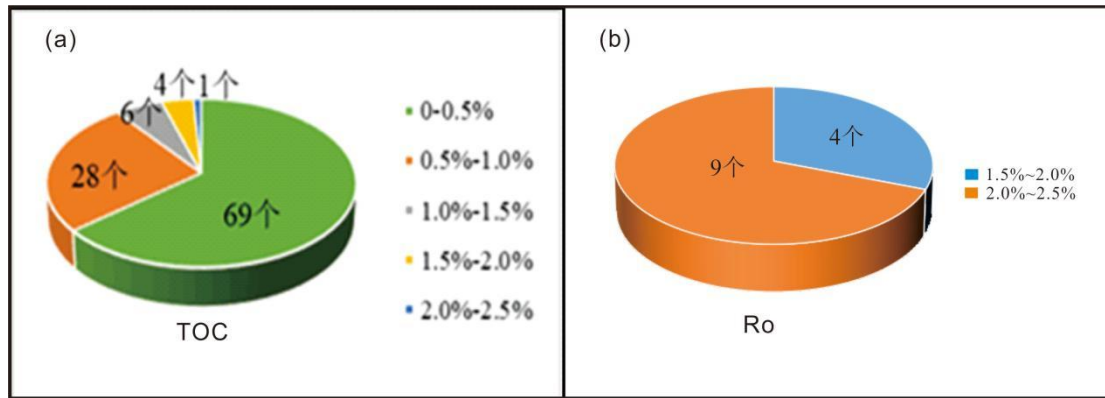


图 8 贵丹地 1 井乌训组 TOC、 R_o 分布频率图

Fig. 8 Distribution frequency of TOC and R_o in Wuxun Formation of Well Guidandi 1

由此可以看出，贵丹地 1 井乌训组厚度达到 318m，总有机碳含量整体较低，大多数小于 0.5%，占 64%，但在中下部富有机质层段平均能达到 1%，大致厚度在 80m 左右（图 2），具备良好的生气条件。

4.2 有机质类型

由于不同来源、不同环境下发育的有机质其生烃潜力和产物有很大的差别，因此，要客观认识烃源岩的性质和生烃条件就必须对有机质类型进行评价（胡建芳等，2017）。测试贵丹地 1 井乌训组 634m 和 723m 两个样品显微组分显示乌训组腐泥组含量 90%~95%，平均 92%；少量的镜质组和惰性组，不含壳质组，表明主要母质以菌藻类低等水生生物等有机质输入为主，没有高等植物混入有机质类型为 I 型。

4.3 有机质成熟度

不同类型的有机质在不同演化阶段其生烃量不同，在热成因的页岩气储层中，烃类是在时间、温度和压力的共同作用下生成的。作为页岩储层系统有机成因气研究的重要指标，成熟度影响了页岩的生烃潜能和被吸附在有机物质表面的天然气量（胡建芳等，2017）。参考中石化黑色页岩成熟阶段划分标准为： R_o 低于 0.5% 为未成熟，0.5~1.3% 为成熟，1.3~2% 为高成熟，2~3% 为过成熟早期阶段，3~4% 为过成熟晚期阶段（史洪亮等 2018，王晔等，2019）。

贵丹地 1 井整体上 R_o 从浅至深逐渐增加，其中最浅的乌训组 13 个样品的反射率 R_o 分析测试结果表明： R_o 分布范围为 1.55~2.41%，平均 2.02%，处于高成熟和过成熟早期演化阶段（图 8b），但是该套页岩较下伏牛蹄塘组页岩 R_o 低（ R_o 平均 3.0~3.5%）（聂国权等，2021），与国内外主要页岩气产气层位，如四川盆地威远地区五峰-龙马溪组页岩（ R_o 平均 1.8~2.6%）（邹才能等，2021）、北美福特沃斯盆地 Barnett 页岩成熟度相当（ R_o 平均 1.1~2.1%）（戴金星等，2020），因此乌训组富有机质页岩成熟度适中，有利于生气。

5 含气性特征

5.1 钻井页岩气显示情况

乌训组含气段在钻井时气测异常明显（图 2），贵丹地 1 井气测异常段为 83.7m/6 层，全烃最高 5%，岩心侵水试验冒泡剧烈（淡永等，2021），在钻至井深 741.20m（迟深 740.00m）发现气测异常，全烃值：1.8296%↑4.9963%，峰值持续 70min， C_1 ：1.7944%↑4.8629%。钻时 22min/m。钻井液密度 1.02g/cm³，粘度 20s，槽面无显示，钻井液体积无变化，停钻 10 小时，全烃值达到 20%，节流点火成功，火焰呈蓝色，高度约 5cm（淡永等，2021）。

5.2 页岩气含气量现场解析

页岩含气量测定方法主要依据解吸法，解吸法是利用解析罐直接测定新鲜岩样中甲烷含量的一种方法，它能够在模拟地层实际环境的条件下反映页岩的含气性特征，因此被用来作为页岩气含量测量的基本方法。贵丹地 1 井在乌训组 631-712m 气测显示最大时取样 4 个(图 2)，换算后总含气量在 0.4-0.8 m³/t，平均 0.6m³/t，其中在 635m 的 1 个样为页岩中灰岩，网裂缝发育。

6 构造保存特征

雪峰古隆起边缘下寒武统乌训组页岩保存时代老，先后经历了多期的构造运动，页岩气保存条件复杂，不同时期构造运动的变形程度、变形方式和变形特征各异。对乌训组生烃和保存影响需根据具体构造进行评价。

6.1 构造事件与生烃演化

研究区自乌训组沉积以来，经历了加里东、海西、印支、燕山和喜山 5 次大规模构造运动（王濡岳等，2016；彭中勤等，2019），通过聂国权等（2021）对研究区贵都地 1 井埋藏史和热演化史模拟结果，受加里东期晚震旦世—中奥陶世区域性伸展构造作用的影响，下寒武统页岩在沉积后迅速埋藏，热演化程度较高，在晚寒武世就达到晚期生油阶段，在中奥陶世即进入生气阶段；研究区在东晚期-海西期加里中奥陶世—早三叠世经历了挤压—伸展构造旋回，埋藏速率不及晚震旦世—中奥陶世；由于埋深不断增加，晚三叠世热演化程度最高，这一时期已超过主要生气阶段，生气能力略有减弱；晚三叠世以来，受印支—燕山—喜山运动区域性构造作用的影响，下寒武统处于强烈隆升阶段，埋深急剧降低，Ro 值不再变化（图 9），早期形成的页岩气藏经历破坏再调整过程。

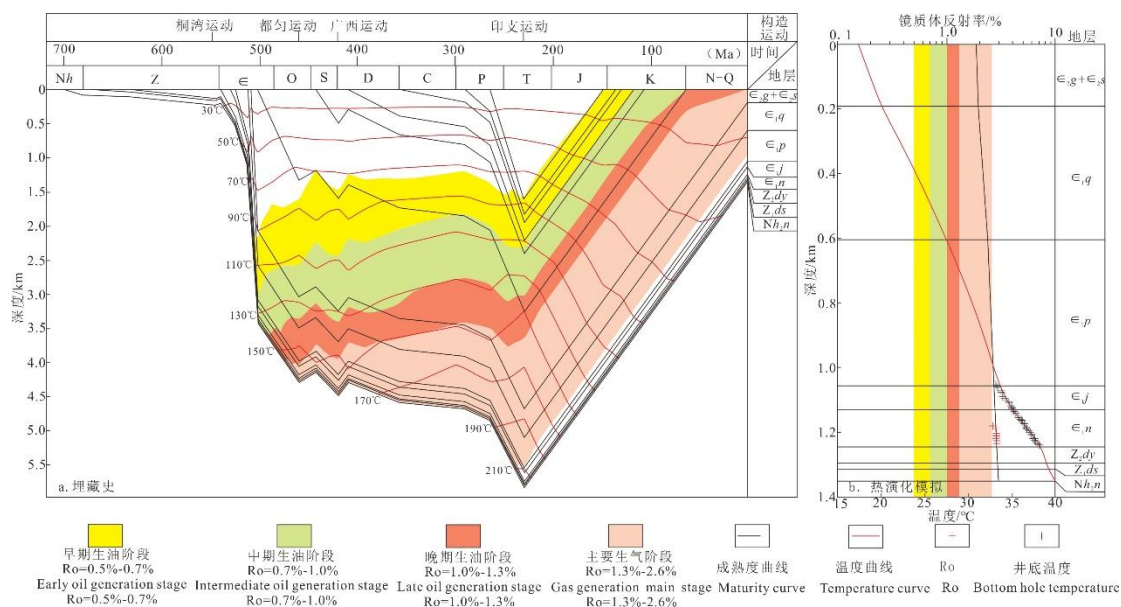


图 9 贵都地 1 井下寒武统埋藏史和热演化史模拟结果（聂国权等，2021）

Fig. 9 Simulation results of Lower Cambrian burial history and thermal evolution history in Well Guidudi 1 (Nie et al., 2021)

6.2 研究区现今构造特征

研究区处于雪峰隆起山前兴仁向斜，整体上研究区向斜地层相对完整、平缓，构造简单。山前为应力集中区，断层及裂缝较为发育，向斜核部为东北向施洞口逆冲断层，核部区域断层对上盘影响较大保存不好，但下盘具相对较好保存条件（图 6，图 10）。兴仁向斜西翼为中缓坡相地层，无乌训组分布，而东翼地层较稳定，断层少，为外缓坡相乌训组沉积区，构造也相对稳定区（图 10）。贵丹地 1 井井深 600 余米在东翼发现了乌训组具有较好显示，

证实了雪峰隆起山前存在相对稳定区，宽缓向斜翼部是有利保存区（图 6，图 10）。这也印证了郭旭升等（2020）认为的雪峰隆起后期可能以升降运动为主，推覆为辅，因此其前缘存在相对稳定区。

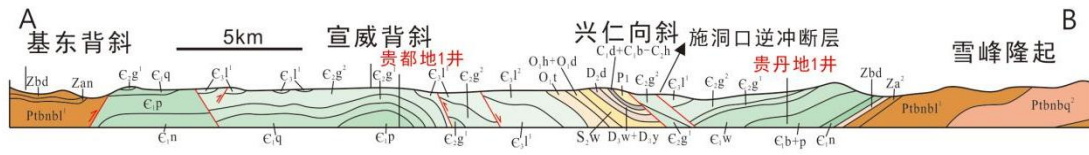


图 10 雪峰西南缘山前构造地层分布图（AB 剖面线见图 6）

Fig. 10 Structure-stratigraphic distribution of the southwestern margin of Xuefeng uplift (the AB section line is shown in Fig. 6)

6.3 盖层条件

乌训组为一套钙质页岩、页岩夹灰岩，区域分布厚度在 300~400m，乌训组富有机质页岩位于其中下部，因此乌训组上部大于 200m 的区域分布的页岩，能够对富有机质页岩段起到良好封盖作用。而且研究区往随着乌训组向南西方向埋深增加（图 11），出露的泥盆系碎屑岩又能起到再次封盖作用，因此往南西方向封盖条件变得更好。

7 乌训组勘探潜力分析

根据已钻井资料、区域地质调查资料、野外露头样品采集和分析测试，以及对前人成果资料收集及整理，对雪峰古隆起西南缘下寒武统乌训组页岩气潜力区进行了分析，评价标准主要借鉴四川盆地及周缘、宜昌等地（郭彤楼，2013；张鉴等，2016），并充分考虑雪峰古隆起边缘乌训组页岩气地质条件以及实际钻探出气情况，以页岩埋深 1000~3500m，距离通天断层大于 2km，页岩有机质丰度 $\geq 1\%$ ，页岩有机质成熟度 1.5%~2.5%，页岩厚度 $\geq 30\text{m}$ ，含气量为解吸总含气量 $\geq 1\text{ m}^3/\text{t}$ ，在充分考虑页岩的储层品质、储层厚度、沉积环境、有机质丰度、有机质成熟度、保存条件等参数的情况下，认为乌训组页岩气的勘探潜力地区大致分布在兴仁向斜东翼的两块区域（图 11），成北东-南西向展布。需要指出的是尽管贵丹地 1 井乌训组解析总含气量仅有 0.4-0.8 m^3/t ，未达到最低 1 m^3/t 的标准，属于非潜力区，但是考虑贵丹地 1 井井深较浅且位于山前构造强破坏带，因此贵丹地 1 井保存条件相对往兴仁向斜核部（划定的潜力区）更差，有理由推测贵丹地 1 井以西在兴仁向斜核部附近的潜力区，随着埋深增加，保存条件变好，解析总含气量能达到 1 m^3/t 的标准。

整体上雪峰隆起前缘乌训组隆升早，成熟度适中，加之山前乌训组为较深水外缓坡相沉积，因此中下部有机质含量较高，乌训组上部及下伏均为页岩，封盖条件也较好，在雪峰隆起西南缘山前具备一定勘探潜力。

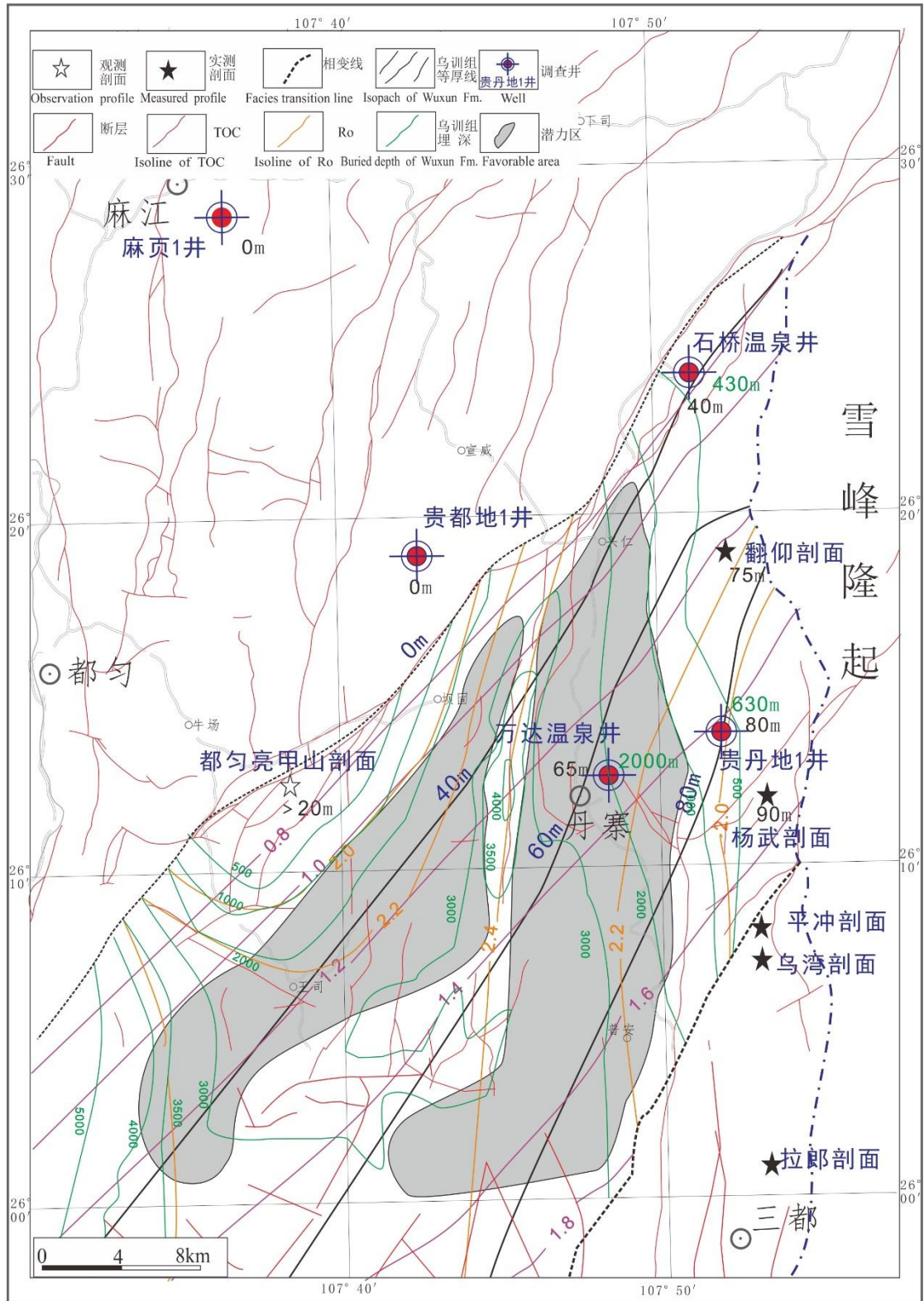


图 11 雪峰隆起西南缘乌训组勘探潜力区预测图

Fig. 11 Prediction map of favorable area of Wuxun Formation in the southwestern margin of Xuefeng uplift

8 结论

(1) 雪峰隆起西南缘下寒武统乌训组为一套外缓坡相沉积，富有机质页岩发育在乌训组中下部，岩石组合为钙质炭质页岩夹薄层灰岩，厚度 30~80m，有机质含量 TOC 平均

为 1%，有机质类型为 I 型腐泥型， R_o 平均为 2.02%，热演化程度适中，具有一定生气能力。

(2) X 射线衍射分析结果表明，雪峰隆起西南缘下寒武统乌训组富有机质泥页岩中脆性矿物含量在 43%~69%，均值为 59.2%；岩石中整体脆性矿物高，有利于后期压裂改造。粘土矿物含量在 16%~37%，均值为 28.2%，页岩储层特征有利于页岩气吸附。页岩为低孔低渗储层，有机质孔、晶间孔、层间孔、碳酸盐岩矿物溶孔为页岩气富集提供了储集空间，但至少 4 期构造裂缝以及构造作用造成的页岩劈理域大大改善了页岩储集能力，是乌训组气测较好的主要原因。

(3) 雪峰西南缘兴仁向斜东翼为外缓坡相沉积区域富有机质页岩发育，该区乌训组具有隆升早，成熟度适中，加之埋深适中，构造稳定且保存条件较好的特征，可作为页岩气勘探的潜力区。

致谢： 中国地质调查局油气资源中心包书景教授级高级工程师为本文提供了指导和建议，中国地质调查局国家地质测试中心为本文做了大量测试工作，在此一并表示衷心感谢！

Reference

- Bowker K A. 2007. Barnett Shale gas production, Fort Worth Basin:issues and discussion[J]. AAPG Bulletin, 91 (4):523-533.
- Cai Xunyu, Wei Baodong, Zhao Peirong. 2005. Characteristics of the marine hydrocarbon rocks in south China[J]. Natural Gas Industry, (03):20-22+193-194 (in Chinese with English abstract).
- Chen Xu, Fan Junxuan, Chen Qing, Tan Lan, Hou Xudong. 2014. Toward a stepwise Kwangsi orogeny[J]. Science China Earth Sciences,44(5):842-850 (in Chinese with English abstract).
- Cui Min, Tang Liangjie, Wang Penghao, Guo Tonglou, Lu Xingbin. 2009. Characteristics of the paleo-stress in the southwestern margin of Xuefeng uplift and its significance for petroleum geology[J]. Journal of geomechanics,15(03):289-295 (in Chinese with English abstract).
- Curtis J B. 2002. Fractured shale-gas systems[J]. AAPG Bulletin, 86(11):1921-1938.
- Dai Jinxing, Dong Dazhong, Ni Yunyan, Hong Feng, Zhang Surong, Zhang Yanling, Ding Ling. 2020. Some essential geological and geochemical issues about shale gas research in China[J]. Natural Gas Geoscience, 31(6):745-760 (in Chinese with English abstract).
- Dan Yong, Yan Jianfei, Bao Shujing, Liang Bin, Ma Long, Nie Guoquan, Cao Junfeng, Ji Shaocong Han Kai. 2021. The momentous discovery of Sinian-Cambrian multi-tier shale gas in Guidandi-1 well of southwest margin of Xuefeng uplift[J/OL]. China Geology:1-3. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20210105.0915.004.html> (in Chinese).
- Ge Mingna, Chen Ke, Chen Xianglin, Wang Chao, Bao Shujing. 2020. The influence factors of gas-bearing and geological characteristics of Niutitang Formation shale in the southern margin of Xuefeng Mountain ancient uplift: A case of Well Huangdi 1[J]. China Geology,3(04):533-544.
- Guo Tonglong, Liu Ruobing. 2013. Implications from marine shale gas exploration breakthrough in complicated structural area at high thermal stage: Taking Longmaxi Formation in well JY1 as an example[J]. Natural Gas Geoscience, 24(4):643-651 (in Chinese with English abstract).
- Guo Xusheng, Hu Dongfeng, Duan Jinbao. 2020. Marine petroleum exploration in South China[J]. Petroleum Geology & Experiment, 42(05):675-686 (in Chinese with English abstract).
- Guo Xusheng, Zhao Yangqiang, Shen Baojian, Wei Xiangfeng, Lu Longfei, Pan Anyang Li Yuyang. 2022. Marine

- shale gas exploration theory in south China: review and products[J]. *Acta Geologica Sinica*, 96(1): 172-182 (in Chinese with English abstract).
- Hickey J J, Henk B. 2007. Lithofacies summary of the Mississippian Barnett Shale, Mitchell 2 T. P. Sims well, Wise County, Texas[J]. *AAPG Bulletin*, 91(4):437-443.
- Hu Jianfang, Peng Pingan. 2017. An Overview and Perspectives on Organic Geochemistry[J]. *Acta sedimentologica Sinica*, 35(05):968-980 (in Chinese with English abstract).
- Leng Jigao, Gong Dajian, Li Fei, Li Peng. 2016. Analyses on the shale gas exploration prospect of the Niutitang Formation in north - eastern Guizhou area[J]. *Earth Science Frontiers*, 23 (2): 029-038 (in Chinese with English abstract).
- Li Shizhen, Zhou Zhi, Nie Haikuan, Zhang Leifu, Song Teng, Liu Weibin, Li Haohan, Xu Qiuchen, Wei Siyu, Shu Tao. 2022. Distribution characteristics, exploration and development, geological theories research progress and exploration directions of shale gas in China[J]. *China Geology*, 5(01):110-135
- Liu An, Cai Quansheng, Chen Xiaohong, Xiao Qilin, Li Hai, Peng Zhongqin, Miao Fengbin, Li Liu Jiahong, Yang Ping, Xie Yuan, Du Qiuding Zhang Di. 2012. Characteristics and hydrocarbon significance of the source rocks of lower Cambrian Niutitang formation on the western side of the Xuefeng Mountain[J]. *Geological Bulletin of China*, 31(11):1886-1893 (in Chinese with English abstract).
- Loucks R G, Reed R M, Ruppel S C, Jarvie D M. 2009. Morphology genesis, and distribution of nanometer-scale pores in siliceous mudstones of the Mississippian Barnett shale[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 79(9):848-861.
- Loucks R G, Ruppel S C. 2007. Mississippian Barnett Shale: Lithofacies and depositional setting of a deep-water shale-gas succession in the Fort Worth Basin, Texas[J]. *AAPG Bulletin*, 91(4):579-601.
- Ma Long, Xu Xuejin, Yan Jianfei, Cao Junfeng, Men Yupeng, Dan Yong, Xiong Guoqing, Sun Yuanyuan, Deng Qi, Yang Fei. 2022. Enrichment laws and regional selection of shale gas at the edge of palaeohigh: A case study on lower Cambrian Niutitang Formation in the southwestern margin of Xuefeng uplift[J]. *Sedimentary Geology and Tethys Geology*, 42(03):426-443 (in Chinese with English abstract).
- Ma Zhongliang, Zheng Lunju, Xu Xuhui, Bao Fang, Yu Xiaolu. 2017. Thermal simulation experiment on the formation and evolution of organic pores in organic rich shale[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 38(1):23-30 (in Chinese with English abstract).
- Miao Fengbin, Peng Zhongqin, Wang Zongxin, Yu yu ning, Mayong, Sui Zhiheng. 2020. Development Characteristics and major controlling factors of shale fractures in the lower Cambrian Niutitang Formation, western margin of Xuefeng Uplift[J]. *Bulletin of Geologic Science and Technology*, 39(02):31-42 (in Chinese with English abstract).
- Nie Guoquan, Li Xiaopan, Dan Yong, Liang Bin, Zhang Qingyu, Li Jingrui, Ji Shaocong. 2021. Burial and thermal history of mud shale in Niutitang Formation of lower Cambrian in southern Guizhou depression : A case study of Guidudi well 1[J]. *Carsologica Sinica*, 40(05): 760-767 (in Chinese with English abstract).
- Nie Haikuan, Zhang Jinchuang, Li Yuxi. 2011. Accumulation Conditions of the Lower Cambrian Shale Gas in the Sichuan Basin and Its Periphery[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 32(6):959-96 (in Chinese with English abstract).
- Peijun, Huang Huilan. 2021. Paleofluid as indicator of shale gas tectonic preservation in the western margin of Xuefeng uplift[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 45(06):1161-1173 (in Chinese with English abstract).
- Peng Zhongqin, Tian Wei, Miao Fengbin, Wang Baozhong, Wang Chuanshang. 2019. Geological Features and Favorable Area Prediction of Shale Gas in Lower Cambrian Niutitang Formation of Xuefeng Ancient Uplift and Its Periphery[J]. *Earth Science*, 44(10):3512-3528 (in Chinese with English abstract).
- Shi Hongliang, Wang Tong, Chen Xia, Ou Yangjiasui, Xiong Xinrui, Wang Yu. 2018. Research on thermal maturity indicators of lower Palaeozoic over-mature shale in southern Sichuan Area [J]. *Fault Block Oil &*

- Gas Fields, 25(01):43-47 (in Chinese with English abstract).
- The geological survey institute of Guizhou province. 2013. Regional geology of Guizhou province[R].Guiyang:The geological survey institute of Guizhou province (in Chinese).
- Wang Jian. Carbonate ramp and their tectonic controls,with an example from the Longwangmiaoian (Earlycambrian) Yangzi carbonate ramp in South China[J]. Lithofacies paleogeography,1990(05):13-22 (in Chinese with English abstract).
- Wang Ruyue, Ding Wenlong, Gong Dajian, Leng Jigao, Wang Xinghua, Yin Shuai, Sun Yaxiong. Gas preservation conditions of marine shale in northern Guizhou area:A case study of the Lower Cambrian Niutitang Formationin the Cen'gong block, Guizhou Province[J]. Oil and Gas Geology, 2016, 37(01): 45-55 (in Chinese with English abstract).
- Wang Ye, Qiu Nansheng, Yang Yunfeng, Rui Xiaoqing, Zhou Yuanyuan, Fang Guangjian, Wu Hang, Shen Baojian, Cheng Lijun, Teng Geer. 2019. Thermal Maturity of Wufeng-Longmaxi Shale in SichuanBasi[J]. Earth Science,44(03):953-971 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zhengjiang, Xie Yuan, Yang Ping, Zhuo Jiewen, He Jianglin, Xie Shangke. 2012. Marine Basin Evolution and Oil and Gas Geology of Sinian-Early Paleozoic Period on the Western Side of the Xuefeng Mountain[J]. Geological Bulletin of China, 31(11):1795-1811 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Gangyi, Bao Shujing,Wang Yufang, Chen Ke, Wang Shengjian, Zhou Zhi, Song Teng, Li Haohang. 2017. Reservoir accumulation model at the edge of palaeohigh and significant discovery of shale gas in Yichang area, Hubei province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 38(4): 441-447 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Gangyi, Wang Yufang, Zhou Zhi, Yu Shufang, Chen Xianglin, Zhang Yunxiao. 2018. Exploration and research progress of shale gas in China[J].China Geology,1(02):257-272.
- Zhang Jian, Wang Lansheng, Yang Yueming, Wan Maoxia, Zou Chunyan, Deng Hongbin, Kong Lingming. 2016. The Development and Application of the Evaluation Method of Marine Shale Gas in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 27(3):433-441 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jinchuan, Xu Bo, Nie Haikuan,Wang Zongyu, Lin Ta, Jiang Shengling, Song Xiaowei, Zhang Qin, Wang Guangyuan, Zhang Peixian. 2004. Reservoiring Mechanism of Shale Gas and Its Distribution[J]. Natural Gas Industry, 24(7):15-18,131-132 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Binsong. Sequence lithofacies paleogeography and favorable reservoir facies belt prediction during the Early Cambrian Longwangmiao period in Guizhou area[D]. 2016. China University of Geosciences (Beijing), (in Chinese with English abstract).
- Zou Caineng, Zhao Qun, Cong Lianzhu, Wang Hongyan, Shi Zhensheng, Wu Jin, Pan Songqi. 2021. Development progress, potential and prospects of shale gas in China [J]. Natural Gas Industry, 41(01):1-14 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 蔡勋育,韦宝东,赵培荣. 2005. 南方海相烃源岩特征分析[J]. 天然气工业,(03):20-22+193-194.
- 陈旭,樊隽轩,陈清,唐兰,侯旭东. 2014. 论广西运动的阶段性[J].中国科学:地球科学,44(5):842-850.
- 崔敏,汤良杰,王鹏昊,郭彤楼,路兴斌. 2009. 雪峰隆起西南缘古应力特征及其石油地质意义[J]. 地质力学学报,15(03):289-295.
- 戴金星,董大忠,倪云燕,洪峰,张素荣,张延玲,丁麟. 2020. 中国页岩气地质和地球化学研究的若干问题[J]. 天然气地球科学,31(06):745-760.
- 淡永,闫剑飞,包书景,梁彬,马龙,聂国权,曹竣锋,季少聪,韩凯. 2021. 雪峰隆起西南缘(贵丹地1井)震旦-寒武系获多层系页岩气重大发现[J/OL].中国地质:1-3.<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20210105.html>
- 翟刚毅,包书景,王玉芳,陈科,王胜建,周志,宋腾,李浩涵. 2017. 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, 38(4):441-447.

- 贵州省地质调查院. 2013. 贵州省区域地质志[R]. 贵阳:贵州省地质调查院.
- 郭彤楼,刘若冰. 2013. 复杂构造区高演化程度海相页岩气勘探突破的启示——以四川盆地东部盆缘 JY1 井为例[J]. 天然气地球科学, 24(4):643-651.
- 郭旭升,胡东风,段金宝. 2020. 中国南方海相油气勘探展望[J]. 石油实验地质, 42(05):675-686.
- 郭旭升,赵永强,申宝剑,魏祥峰,卢龙飞,潘安阳,李宇平. 2022. 中国南方海相页岩气勘探理论: 回顾与展望[J]. 地质学报, 96(1): 172~182.
- 胡建芳,彭平安. 2017. 有机地球化学研究新进展与展望[J]. 沉积学报, 35(05):968-980.
- 冷济高,龚大建,李飞,李鹏. 2016. 黔东北地区牛蹄塘组页岩气勘探前景分析[J]. 地学前缘, 23(2):29-38.
- 刘安,蔡全升,陈孝红,肖七林,李海,彭中勤,苗凤彬,李培军,黄惠兰. 2021. 雪峰隆起西缘页岩气构造保存条件的古流体评价[J]. 大地构造与成矿学, 45(06):1161-1173.
- 刘家洪,杨平,谢渊,杜秋定,张娣. 2012. 雪峰山西侧地区下寒武统牛蹄塘组烃源岩特征与油气地质意义[J]. 地质通报, 31(11):1886-1893
- 马龙,徐学金,闫剑飞,曹竣锋,门玉澎,淡永,熊国庆,孙媛媛,邓奇,杨菲. 2022. 古隆起边缘页岩气富集规律与选区——以雪峰西南缘下寒武统牛蹄塘组为例[J]. 沉积与特提斯地质, 42(03):426-443.
- 马中良,郑伦举,徐旭辉,鲍芳,余晓露. 2017. 富有机质页岩有机孔隙形成与演化的热模拟实验[J]. 石油学报, 38(1):23-30.
- 苗凤彬,彭中勤,汪宗欣,于玉宁,马勇,隋志恒. 2020. 雪峰隆起西缘下寒武统牛蹄塘组页岩裂缝发育特征及主控因素[J]. 地质科技通报, 39(02):31-42.
- 聂国权,李小盼,淡永,梁彬,张庆玉,李景瑞,季少聪. 2021. 黔南坳陷下寒武统牛蹄塘组泥页岩埋藏史与热史研究——以贵都地 1 井为例[J]. 中国岩溶, 40(05):760-767.
- 聂海宽,张金川,李玉喜. 2011. 四川盆地及其周缘下寒武统页岩气聚集条件[J]. 石油学报, 32(6):959-967.
- 彭中勤,田巍,苗凤彬,王保忠,王传尚. 2019. 雪峰古隆起边缘下寒武统牛蹄塘组页岩气成藏地质特征及有利区预测[J]. 地球科学, 44(10):3512-3528.
- 史洪亮,王同,陈霞,欧阳嘉穗,熊歆睿,王禹. 2018. 川南下古生界高演化页岩成熟度指标[J]. 断块油气田, 25(01):43-47.
- 王剑. 1990. 缓坡及其构造背景——以中国南方早寒武世龙王庙期扬子碳酸盐缓坡为例[J]. 岩相古地理, (05):13-22.
- 汪正江,谢渊,杨平,卓皆文,何江林,谢尚克. 2012. 雪峰山西侧震旦纪-早古生代海相盆地演化与油气地质条件[J]. 地质通报, 31(11):1795-1811.
- 王濡岳,丁文龙,龚大建,冷济高,王兴华,尹帅,孙雅雄. 2016. 黔北地区海相页岩气保存条件——以贵州岑巩区块下寒武统牛蹄塘组为例[J]. 石油与天然气地质, 37(01):45-55.
- 王晔,邱楠生,仰云峰,芮晓庆,周圆圆,方光建,吴航,申宝剑,程礼军,腾格尔. 2019. 四川盆地五峰-龙马溪组页岩成熟度研究[J]. 地球科学, 44(03):953-971.
- 张鉴,王兰生,杨跃明,万茂霞,邹春艳,邓鸿斌,孔令明. 2016. 四川盆地海相页岩气选区评价方法建立及应用[J]. 天然气地球科学, 27(3):433-441.
- 张金川,徐波,聂海宽,汪宗余,林拓,姜生玲,宋晓微,张琴,王广源,张培先. 2008. 中国页岩气资源勘探潜力[J]. 天然气工业, 28(6):136-140, 159-160.
- 郑斌嵩. 2016. 贵州地区早寒武世龙王庙期层序岩相古地理及储层有利相带预测[D]. 中国地质大学(北京).
- 邹才能,赵群,丛连铸,王红岩,施振生,武瑾,潘松圻. 2021. 中国页岩气开发进展、潜力及前景[J]. 天然气工业, 41(01):1-14.