

刘浩杰, 张庆玉, 巴俊杰, 等. 黔南坳陷丹寨页岩气有利区地质条件与地球化学特征[J]. 中国岩溶, 2024, 43(5): 1196-1209.

DOI: 10.11932/karst20240515

黔南坳陷丹寨页岩气有利区地质条件与地球化学特征

刘浩杰¹, 张庆玉², 巴俊杰², 季少聪², 聂国权², 李 振²

(1. 中国地质调查局, 北京 100037; 2. 中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室/联合国教科文组织国际岩溶研究中心, 广西 桂林 541004)

摘要: 黔南坳陷区域寒武系牛蹄塘组页岩分布广泛, 层厚较大, 富集有机质, 处于成熟阶段, 页岩气勘探和开发潜力较好, 因此查明不同地区富有机质页岩层段有利区地质条件及其地球化学特征已成为页岩气勘探的关键问题。文章利用沉积学、有机岩石学和地球化学等综合手段, 绘制丹寨有利区分布图, 重点探讨了研究区有利区地质条件及优质烃源岩的生烃潜力和时空分布。结果表明: 丹寨地区有利区显示该区牛蹄塘组页岩主体沉积环境为深水陆棚至深水盆地; 富有机质页岩厚度为60~200 m, 整体呈现出由西北向东南逐渐增厚的趋势; 总有机碳含量主要介于4.5%~6.0%, 有机质成熟度则主要在2.5%~2.7%之间, 且从东北向西南方向逐渐降低, 构造活动对地层保存条件和页岩气富集程度产生了重要影响; 揭示黔南丹寨地区寒武系牛蹄塘组页岩地质条件较好, 具有进一步深入开展页岩气调查勘探的潜力。

关键词: 黔南坳陷; 牛蹄塘组; 黑色页岩; 有机地球化学; 储层特征; 页岩气有利区

创新点: (1) 划分精细化勘探区, 绘制丹寨页岩气有利区分布图; (2) 揭示丹寨页岩气有利区内优质烃源岩的分布与潜力, 进一步证明其具有页岩气勘探开发的可行性; (3) 提出构造保存性是丹寨页岩气有利区页岩气成藏的关键因素。

中图分类号: P618.13 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2024)05-1196-14

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

页岩气已成为全球能源格局中不可忽视的一部分^[1]。作为一种非传统的天然气资源, 页岩气主要蕴藏于富含有机质的页岩层中, 依靠水力压裂和水平钻井等技术实现开采^[2]。随着全球能源需求的不断增长和传统化石能源供给的紧张, 多个国家在页岩气开发方面取得了显著进展, 极大改变了全球能源供需格局^[3-4]。

美国是全球页岩气开发的先驱和最大生产国^[5]。自21世纪初以来, 得益于水平钻井和水力压裂技术

的进步, 美国开启了页岩气大规模商业化开发的新纪元^[6-7]。根据美国能源信息署(EIA)数据, 2023年美国天然气总产量中约75%来自页岩气, 而这一比例在2005年还不到10%。2023年, 美国天然气总产量达约9800亿m³, 其中超过7000亿m³由页岩气贡献^[8]。

截至2024年, 中国页岩气储量位居世界第三, 约31.6万亿m³, 占全球总资源量的10%左右^[9]。尽管中国的页岩气开发起步较晚, 但近年来已取得显著进展。中国的页岩气资源主要集中在四川盆地、塔里木盆地和渤海湾盆地等地区, 其中四川盆地是

基金项目: 中国地质调查项目(DD20221658); 广西重点研发基金(桂科 AB23026062); 地科院重点基金(JKYZD202331, JKYQN202366)

第一作者简介: 刘浩杰(1993—), 男, 助理工程师, 从事石油地质学与油气测井研究。E-mail: liuhaojie@mail.cgs.gov.cn。

通信作者: 张庆玉(1983—), 男, 正高级工程师, 从事油气古岩溶储层与页岩气地质研究。E-mail: zqingyu@mail.cgs.gov.cn。

收稿日期: 2024-04-09

开发的主要区域^[10]。根据中国国家能源局的数据, 2023年中国页岩气产量首次突破230亿 m^3 , 较2022年增长了12%。其中, 四川盆地的富顺—永川页岩气田是全国最大页岩气田, 2023年的产量超过130亿 m^3 。

黔南拗陷位于扬子地块的西南缘, 是中国南方重要的页岩气资源区^[11]。近年来, 该区域的页岩气勘探工作取得了显著进展^[12-17]。其拗陷内发育多个富含有机质的黑色页岩层, 包括下寒武统牛蹄塘组、奥陶系五峰组和下志留统龙马溪组, 这些地层具有较高的有机碳含量和良好的储层特性, 是页岩气的主要赋存层位^[18-19]。其中, 牛蹄塘组因其较大厚度和高有机碳含量, 被认为是极具开发潜力的层系之一^[20]。根据中国地质调查局最新数据, 黔南拗陷的页岩气资源总量估计约为1.2万亿 m^3 , 已探明的可采资源量约为1500亿 m^3 ^[21]。

尽管黔南地区已有一定的研究进展, 但针对有利区的地质条件、可溶性有机质和成藏机理的深入研究仍相对不足^[22-24]。本研究通过对黔南拗陷丹寨地区典型剖面 and 页岩气调查井的实测和集中采集样品, 运用综合分析方法对丹寨有利区的地质条件和有机地球化学特征进行系统分析, 探讨寒武系牛蹄塘组优质烃源岩的分布与发育规律, 揭示出该区域具备较好的页岩气成藏条件, 明确了页岩气有利区的空间分布规律, 构造活动对页岩气保存条件产生的重要影响, 以期为黔南拗陷页岩气勘探开发提供科学依据, 也为类似地质条件下的页岩气选区评价提供参考。

1 区域地质概况

黔南拗陷位于贵州省南部, 呈三角形分布(图1), 面积约3万 km^2 ^[12, 25]。拗陷北部、东部、西南部发育多条断裂, 其中安顺—贵定斜坡北部发育的安顺—贵阳断裂连接黔中隆起, 拗陷东部发育的三都—施洞口断裂同雪峰隆起相连, 西南部紫云—罗甸—都安断裂相接南盘江拗陷。黔南拗陷主体位于扬子地块南缘, 毗邻湘桂地体, 曹慧等^[10]认为其在早寒武世时的古地理位置接近赤道。

黔南拗陷基底构造显示为东浅西深, 拗陷东部基底埋深为1000~4000 m, 西部埋深8000~15000 m。基底上覆地层为震旦系至三叠系的海相沉积^[25]。在大型构造运动方面, 拗陷经历广西运动、印支运动、

燕山运动和喜马拉雅运动等多次构造活动。加里东运动促使拗陷内部初步抬升和沉降, 而印支运动和燕山运动则导致了褶皱和断裂的发育^[23, 26], 下古生界广泛出露^[13]; 中西部地层保存相对完整, 主要为三叠系出露区。下寒武统牛蹄塘组在拗陷的东部区域, 如三都、麻江和丹寨等地发育较好, 厚度在50~150 m之间^[18]。黔南拗陷的地层岩性组合表现出显著的多样性和复杂性^[27], 构造活动对地层保存条件和页岩气富集程度产生了重要影响。

黔南拗陷的断裂体系主要由北东—南西向的主断裂和东西向的次级断裂构成。这些断裂不仅影响了地层的沉积厚度和分布, 还对页岩气的保存产生了深刻影响^[24]。黔南拗陷是一个以古生界沉积为主的残留型盆地, 早古生代时为陆缘裂陷盆地, 自晚古生代以来被周围的隆起带和造山带所围限, 沉积条件相对稳定^[25]。在这种构造背景下, 可能存在保存条件良好的区域, 为油气成藏提供了基础。

黔南地区地层发育良好, 覆盖了从新元古代到第四纪的各个地质时期, 主要由海相沉积岩组成。牛蹄塘组在该地区广泛分布, 厚度从几十米到几百米不等。该区主要岩性为黑色薄至中层的炭质泥岩、页岩和炭质粉砂岩, 并发育有深灰色薄层砂质或硅质岩夹层。牛蹄塘组底部发育的炭质泥岩、页岩可用于区分下伏老堡组或灯影组^[9, 27]。

2 丹寨页岩发育特征

2.1 地质条件

贵州省主要页岩层为寒武系牛蹄塘组、奥陶系五峰组—志留系龙马溪组及石炭系打屋坝组/旧司组^[9]。奥陶系五峰组—志留系龙马溪组页岩气勘探程度较高, 进展顺利, 在贵州省的不同地层中, 勘探成果存在显著差异。寒武系牛蹄塘组作为贵州最早的页岩气勘探评估对象, 钻探结果通常显示含气量较低, 气体中氮含量较高, 反映出复杂的成藏条件^[25]。而石炭系打屋坝组和旧司组仅进行了少量钻井勘查, 部分井显示出较高的含气量。而多口水平井的成功施工使某一特定层系成为全省勘查程度最高的地层^[17]。贵州省其他页岩层由于分布面积较小, 勘查研究则相对较少。

本研究的重点区域丹寨县坐落于贵州省东南部, 东面与雷山县相邻, 南面连接三都水族自治县, 西面

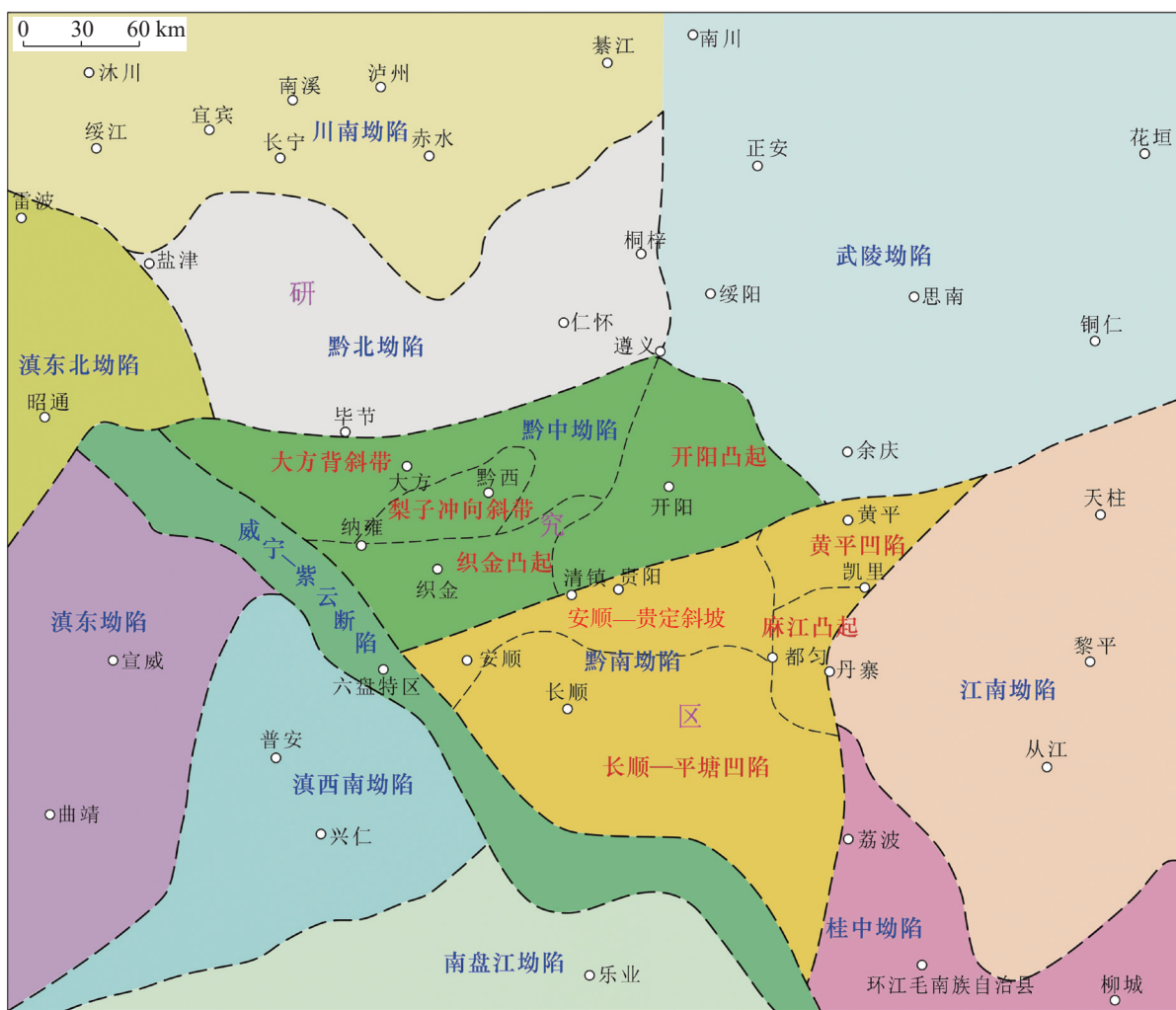


图1 黔南拗陷及周缘区域构造分布图(底图据文献[22]修改)

Fig. 1 Structural distribution of the Qiannan depression and its surrounding areas (base map modified according to reference [22])

毗邻都匀市和麻江县,北面则与凯里市接壤。该区域的构造位置处于华南板块与扬子板块的结合部,位于江南造山带的西缘(图2)。重点目标层位为下寒武统牛蹄塘组海相富有机质页岩层位。

研究区地处华南板块与扬子板块结合部位,江南造山带西缘,经历了多期构造运动,形成现今较为复杂的构造面貌^[28]。研究区多发育北北东—南南西向褶皱、断层,北东—南西向构造同样较发育。研究区主要褶皱类型为线状褶皱,数量较多,向斜保存完整,而背斜因断裂作用多呈破碎残缺状态(图2)。在野记—地祥断裂带以西,褶皱多为南北向,少数呈北东向展布。通过广域电磁识别断层从东向西为:F1 铜仁—三都断裂、F2 牛场断裂、F3 荔波断裂、F4 甲倒断裂等(图3)。

丹寨县一带的地层未遭受太多沉积间断,从下到上发育新元古代下江群到二叠系和第四系的岩层,

仅有中、上奥陶统和上志留统缺失,其中黔南拗陷及周缘地区下寒武统地层对比见表1。

在丹寨县一带的研究区域,普安—朱砂场一线分隔寒武系与震旦系。该线北部为扬子过渡地层区,显示为浅海碳酸盐台地—广海陆棚相碳酸盐沉积(表2);南部为江南地层区,属于一套台地边缘斜坡—浅海盆地相滑塌沉积,并可见砾屑—粉屑碳酸盐和陆源细碎屑的韵律沉积。

2.2 牛蹄塘组展布特征

贵州省的寒武系页岩层广泛分布,特别是下部的黑色页岩发育尤为显著,厚度通常介于40~100 m之间,展现出明显的厚度特征。这些页岩富含有机质,多数地区的有机质含量超过4.0%。然而,经过多次次生烃的热演化,这些页岩已达到高成熟度,进入了过成熟阶段。

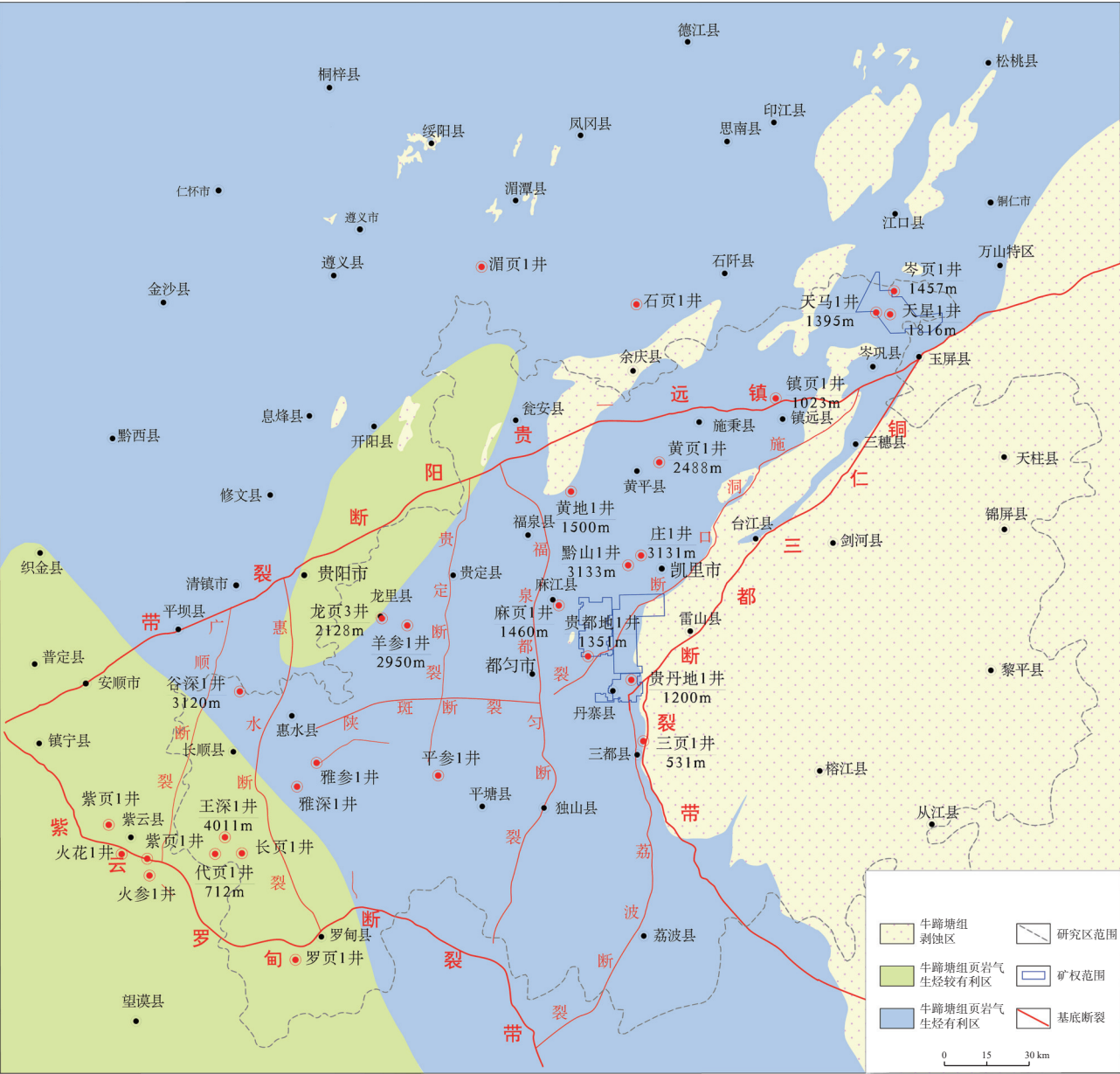


图 2 黔南坳陷丹寨及周围地区牛蹄塘组资源潜力分布

Fig. 2 Distribution of resource potential of Danzhai in the Qiannan depression and of its surrounding area—the Niutitang formation

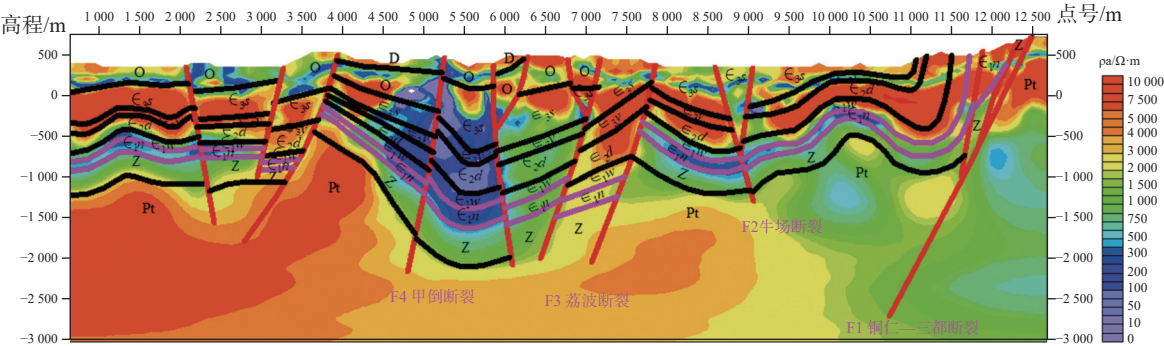


图 3 丹寨工区广域电磁测量地层发育及构造解译图

Fig. 3 Interpretation of stratigraphic development and structures of the work area in Danzhai, measured by wide-field electromagnetic survey

表 1 贵州黔南坳陷及周缘地区下寒武统地层对比^[29]

Table 1 Comparison of lower Cambrian strata in the Qiannan depression and its surrounding areas of Guizhou Province^[29]

统	阶	地 层				
		川西南	川东南、黔北—黔中	黔东南皋	黔南黄平	黔南丹寨
中寒武统	毛庄阶	陡坡寺组	高台组	高台组		凯里组
	龙王庙组	龙王庙组	清虚洞组	清虚洞组		乌训组
	沧浪铺组	沧浪铺组	金顶山组	杷榔组		杷榔组
下寒武统			明心寺组	变马冲组		变马冲组
	筇竹寺组	筇竹寺组		九门冲组		九门冲组
			牛蹄塘组	牛蹄塘组	九门冲组	九门冲组
	梅树村阶	麦地坪组		老堡组		牛蹄塘组
上震旦统		灯影组	灯影组	灯影组		灯影组

表 2 丹寨研究区牛蹄塘组沉积环境划分方案

Table 2 Division scheme for the sedimentary environment of the Niutitang formation in the study area of Danzhai

目标层系	沉积微相	沉积亚相	沉积相	沉积体系
牛蹄塘组	泥棚	浅水陆棚	陆棚	海洋沉积体系
	粉砂质泥棚			
	粉砂质碳质泥棚	深水陆棚		
	碳质泥棚			

在丹寨地区,以总有机碳含量(TOC)大于 2.0% 作为下限标准,牛蹄塘组下部为富有机质页岩层位,有机碳含量由下至上成递减趋势,与沉积相、古水深具有较好的相关性。在页岩厚度方面,研究区内牛蹄塘组富有机质页岩在区域上分布较为广泛,地层纵向连续厚度较大,至丹寨地区页岩厚度通常可达 100 m 以上。

对研究区牛蹄塘组地层进行了剖面的测量、样品的采集与测试,结果显示:位于黔南坳陷西侧江口地层区块的贵都地 1 井,牛蹄塘组富有机质页岩(TOC > 2.0%)连续厚度超过 56.9 m;坳陷中部台江地层区块,丹寨南皋一带的剖面测量结果显示:部分区块富有机质页岩厚度超过 114.3 m,至丹寨上寨—龙坡剖面,牛蹄塘组页岩累计地层厚度稳定至 97.21 m。研究区东南部三都地层区块,页岩厚度增至 507.91 m;在三都湾滩剖面,页岩层厚大于 45 m,具体厚度则由于断层影响难以测定。研究区外三都水碾剖面处,富有机质页岩厚度为 350 m,至拉朗地区,厚度增至 600 m 以上^[23]。总体而言,研究区牛蹄塘组富有机质页岩厚度由东南部向西北方向逐渐减小,该趋势同沉积相分布具有一定联系,表现为从深水盆地相向深水陆棚相过渡,富有机质页岩的厚度也逐渐变薄(图 4)。

在丹寨调查区域内,牛蹄塘组的浅水陆棚相主

要零星分布于地层中上部,主要类型为黄灰色、灰色至深灰色的含粉砂泥(页)岩,并发育灰色薄层泥质粉砂岩和泥岩夹层;沉积构造方面,可见水平层理以及对称和不对称的波痕,局部地区还可见少量交错层理。总体来看,牛蹄塘组在丹寨县兴仁镇至都匀市坝固镇,以及三都县梁家沟一带的地层厚度最大,黑色泥岩在该区域也较为厚实,是整个调查区牛蹄塘组(渣拉沟组)的沉积中心。

黔南坳陷丹寨地区寒武系牛蹄塘组的保存条件与构造运动密切相关,尤其是顶底板条件对页岩气的保存起到了重要作用。东部地区由于构造稳定,底板主要为硅质岩,具有较好的封盖条件,而在西部地区,底板为白云岩,保存条件较差,导致页岩气散失的风险较大。

3 有机地球化学特征

3.1 总有机碳含量

对丹寨地区寒武系牛蹄塘组/渣拉沟组野外剖面、钻井岩心进行取样、测试,并制作平面 TOC 等值线图。结果显示:丹寨地区牛蹄塘组/渣拉沟组 TOC 整体上较高,在剖面上表现出的最大平均值在三都湾滩剖面,渣拉沟组 TOC 平均值为 5.70%,但由于该剖面仅收集了 2 个数据,所以测试结果不具有代表性。

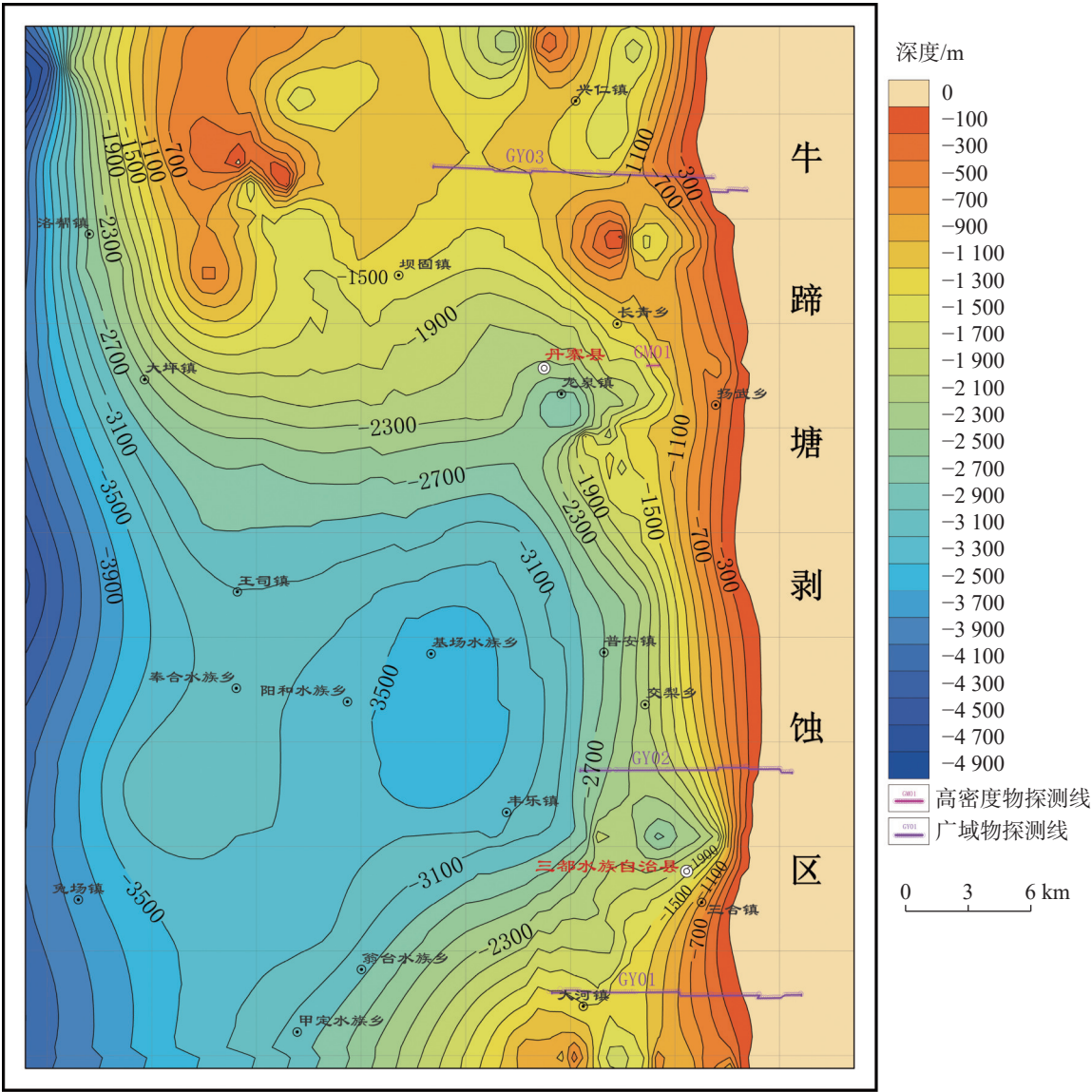


图 4 丹寨地区寒武系牛蹄塘组顶板埋深图

Fig. 4 Roof burial depth of the Cambrian Niutitang formation in Danzhai

三都梁家沟—柳树坪剖面, 渣拉沟组 TOC 平均值为 5.47%。在研究区南部的三都水碾剖面, 渣拉沟组的平均有机碳含量为 2.67%。在西部区域, 牛蹄塘组在贵都地 1 井和贵丹地 1 井的平均 TOC 值分别为 2.79% 和 3.35%。整体来看, TOC 的平面分布呈现出东南高、西北低的趋势: 研究区西部、西北部平均 TOC 低于 4.0%, 中部地区 TOC 在 4.5%~6.0% 之间, 丹寨以东 TOC 或在 5.0% 之上(图 5 左)。

为深入了解矿物组成, 对贵丹地 1 井牛蹄塘组的富有机质页岩进行了黏土矿物和全岩 X 射线衍射的连续采样分析。结果表明: 牛蹄塘组矿物成分中黏土矿物平均含量为 33.4%; 硅酸盐矿物平均含量为 16.1%, 其中石英平均含量为 44.5%, 长石平均含量

为 1.9%, 长石矿物中钾长石含量为 2.6%, 斜长石含量为 1.1%; 碳酸盐矿物平均含量为 3.0%, 其中方解石平均含量为 2.8%, 白云石平均含量为 4.9%, 菱铁矿平均含量为 1.2%; 黄铁矿平均含量为 7.3%; 石膏类矿物平均含量为 0.1%; 钙芒硝平均含量为 1.9% (图 6)。

纵向上, 黏土矿物自下而上先增多再减少, 硅酸盐矿物自下而上先减少后增多, 碳酸盐矿物分布较为稳定, 在部分灰岩层系与灰质含量较多的泥页岩层位明显增多, 黄铁矿自下而上先增多后减少, 石膏类矿物分布较为均一, 钙芒硝自下而上先减少后增多。

3.2 有机质成熟度

鉴于寒武系牛蹄塘组和渣拉沟组的沉积有机质

主要来自海洋低等生物,导致镜质体组分缺乏而沥青质含量丰富,为准确计算等效镜质体反射率(R_o),本研究采用了丰国秀等^[30]提出的公式 $R_o=0.3195+0.679 \times R_b$,其中 R_b 表示沥青反射率。

丹寨地区牛蹄塘组/渣拉沟组泥页岩热演化程度在研究区南部相对较高,最高在三都水碾剖面 R_o 可达 4.29%,处于过成熟的晚期。在研究区东部的贵丹地 1 井,牛蹄塘组的 R_o 介于 3.42%~4.40%,平均值为 4.04%,处于过成熟的晚期。研究区西部的贵都地 1 井,牛蹄塘组的 R_o 介于 3.12%~3.36%,平均值为 3.24%。研究区中部三都县三页 1 井,渣拉沟组的 R_o 介于 2.13%~3.27%,平均值为 2.52%。在丹寨东部地区, R_o 值相对较低,小于 3.0%;而在其他大部分区域, R_o 值介于 3.0% 至 4.2%。有机质的热演化程度呈现出从北部、西北部向东部、东南部逐渐降低的趋势(图 5 右)。虽然丹寨地区牛蹄塘组/渣拉沟组页岩的热演化程度较高,但根据四川盆地的勘探经验,该组泥页岩仍具备良好的页岩气潜力。

3.3 有机质类型

根据地史生物演化进程规律,早古生代尚未发现较高等生物,出现高等植物发生在上古生代泥盆纪以后^[31]。前人在三都—丹寨地区开展过牛蹄塘组页岩有机质类型的研究,结果显示丹寨南皋剖面牛蹄塘组下部黑色页岩干酪根显微组分腐泥组占 70.91%, $\delta^{13}C$ 值为-33.7‰~-29.1‰,属 I 型干酪根^[3];马龙等^[17]分析结果显示贵都地 1 井牛蹄塘组干酪根 $\delta^{13}C$ 值为-34.67‰~-30.27‰,三都梁家沟剖面渣拉沟组干酪根 $\delta^{13}C$ 值为-34.05‰~-32.00‰,干酪根类型均为 I 型有机质。滇黔桂地区下古生界烃源岩的有机质主要来源于细菌、藻类及海洋浮游动植物,有机质类型属于腐泥型^[2]。

4 页岩气储层特征

4.1 矿物组成

通过对贵都地 1 井、贵丹地 1 井和三都拉郎剖面牛蹄塘组、三都姑顶剖面、水碾剖面渣拉沟组页岩进行全岩 X 射线衍射分析,结果显示渣拉沟组页岩矿物组成以石英类(石英、长石、黄铁矿)为主,黏土矿物次之,不含碳酸盐矿物(图 7)。除 1 个样品以

黏土矿物为主外,其余所有页岩样品的石英类矿物成分占总矿物成分的 50% 以上,所有样品中均未检测到碳酸盐矿物。贵丹地 1 井牛蹄塘组页岩矿物组成以石英类为主,其中石英含量介于 35.2%~56.3%,平均值为 44.47%,黏土矿物次之,含量介于 21.0%~53.3%,平均值为 33.41%,碳酸盐矿物含量最低,介于 1.1%~27.5%,平均值为 7.69%。贵都地 1 井牛蹄塘组页岩矿物组成分布范围较大,以石英类为主,其中石英含量介于 8.0%~58.0%,平均值为 37.15%,长石含量介于 2.0%~28.0%,平均值为 10.77%,黄铁矿含量介于 0~11.0%,平均值为 5.56%,黏土矿物次之,含量介于 5.0%~55.0%,平均值为 30.83%,碳酸盐矿物含量最低,介于 0~65.0%,平均值为 13.15%。

4.2 储集空间类型

氩离子抛光—场发射扫描电镜图像显示,丹寨地区牛蹄塘组/渣拉沟组页岩中发育不同类型的孔隙,主要分为有机孔、无机孔和微裂缝三种类型,并以无机孔为主,包括粒间孔、粒内孔、溶蚀孔等。

4.2.1 粒间孔

粒间孔为同种或不同种颗粒、晶体或化石间的孔隙。丹寨地区牛蹄塘组页岩粒间孔主要由同种或多种矿物相互支撑形成,可见无定型石英粒间孔、片状伊利石粒间孔、长石颗粒粒间孔、草莓状黄铁矿粒间孔等(图 8a)。粒间孔形态多为槽状、孔喉状和不规则状,连通性相对较好。

4.2.2 粒内孔

粒内孔为颗粒、晶体或化石内孔隙,包括印模孔和化石内孔(图 8b)。丹寨地区牛蹄塘组页岩粒内孔主要发育于石英、黏土矿物、长石、碳酸盐矿物和草莓状黄铁矿内部。粒内孔形态多为球形、槽状或者蜂窝状,孔径大小不一,连通性相对较差。

4.2.3 溶蚀孔

页岩中长石、碳酸盐等矿物在溶蚀作用下形成的孔隙,其大小、形态受溶蚀作用影响。研究区牛蹄塘组页岩溶蚀孔比例相对较低,大多数孤立存在,仅有少量溶蚀孔连通,形态以椭圆形、三角形、多边形为主,连通性差(图 8c)。

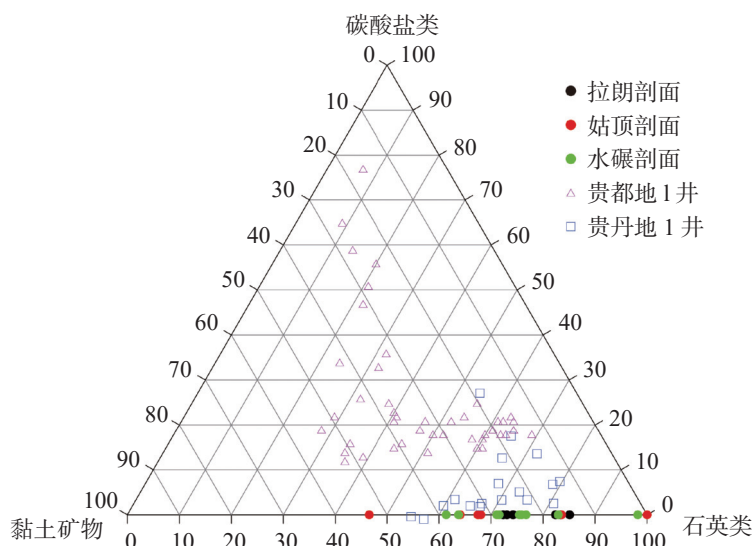


图 7 丹寨地区牛蹄塘组/渣拉沟组页岩矿物组成特征

Fig. 7 Composition characteristics of the shale mineral in the Niutitang formation/the Zhalagou formation in Danzhai

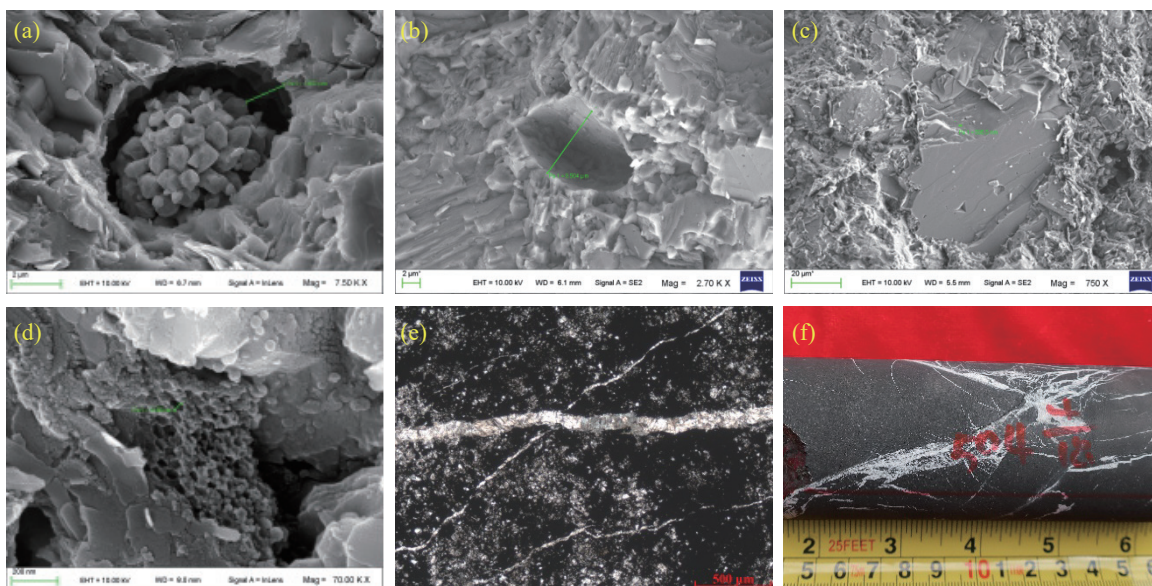


图 8 丹寨地区牛蹄塘组/渣拉沟组储集空间类型特征

(a) 草莓状黄铁矿发育晶间孔, 牛蹄塘组, 三都拉郎剖面 (b) 铸膜孔, 牛蹄塘组, 贵都地 1 井 (c) 钠长石粒内溶孔, 牛蹄塘组, 贵都地 1 井 (d) 有机孔发育, 渣拉沟组, 三都水碾剖面 (e) 裂缝, 方解石充填, 牛蹄塘组, 贵丹地 1 井 (f) 裂缝, 方解石充填, 牛蹄塘组, 贵都地 1 井

Fig. 8 Characteristics of reservoir space types in the Niutitang formation/the Zhalagou formation in Danzhai

(a) strawberry-shaped pyrite with intergranular pores, Sandulalang section in the Niutitang Formation (b) cast film pore, Guidudi Well 1 in the Niutitang Formation (c) intragranular dissolution pore of sodium feldspar, Guidudi Well 1 in the Niutitang Formation (d) development of organic pore, Sandushuonian section in the Zhalagou Formation (e) cracks filled with calcite, Guidandi Well 1 in the Niutitang Formation (f) cracks filled with calcite, Guidudi Well 1 in the Niutitang Formation

4.2.4 有机孔

丹寨地区牛蹄塘组/渣拉沟组热演化程度已达过成熟阶段, 页岩中可见有机质孔, 主要发育于有机质或富含有机质的黏土矿物中, 在其他矿物之间很少见。有机质孔形状多为蜂窝状、球状或椭球状, 孔隙

相对较小, 多为纳米级别, 连通性较好(图 8d)。

4.2.5 微裂缝

野外露头 and 钻井岩心观察发现, 丹寨地区牛蹄塘组/渣拉沟组微裂缝非常发育(图 8e, 图 8f)。微裂缝宽度及延伸长度分布范围较大, 呈弯曲条带状、网

状分布,多被方解石、有机质等充填。微裂缝连通性较好,既可作为页岩气储集空间,也是页岩气运移的主要渗流通道之一。

4.3 储层物性特征

通过对贵都地 1 井、贵丹地 1 井牛蹄塘组页岩 12 组样品进行孔隙度、渗透率测试,结果显示绝大部分样品的孔隙度、渗透率均较低,孔隙度介于 0.65%~1.71%,渗透率介于 $0\sim0.05\times10^{-3}\mu\text{m}^2$,但其中一个样品可能受裂缝影响,孔隙度达到 4.03%,渗透率达到 $1.44\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。牛蹄塘组页岩基质孔隙度和渗透率较低,属低孔低渗页岩储层,但局部裂缝的发育可改善页岩的孔渗性。

5 有利区分布特征

通过对丹寨—三都地区牛蹄塘组页岩埋深、厚度分布,以及典型钻井、剖面牛蹄塘组页岩有机地球化学特征、储层特征分析可知,页岩气有利区内牛蹄塘组页岩成藏条件较好,页岩厚度大、埋深适中、TOC 高、Ro 适中、顶底板条件较好;埋深介于 1000~2500 m,矿物组成以石英类为主,黏土矿物次之,孔渗性较好,储集空间类型包括有机孔、无机孔和微裂

缝三种类型,顶板为九门冲组、变马冲组、乌训组的致密岩层,底板为老堡组硅质岩,具备良好的封闭性。

研究区丹寨地区构造活动频繁,有机质成熟度较高,牛蹄塘组页岩气地层压力显示为常压,贵都地 1 井、贵丹地 1 井的钻探显示该区井位单井产量较低,目前仍处于勘探评价和突破阶段。由于页岩气成藏具有自生自储的性质,在有利区参数的选择与标准制定方面,应充分考虑热演化程度的作用,将其作为关键因素,优先评价 Ro 低于 3.5% 的区域(表 3),同时综合页岩厚度、有机碳含量和孔隙度等参数制定标准。通过以上认识,制定页岩气有利区的优选标准,基于丹寨地区下寒武统牛蹄塘组富有机质页岩形成于深水沉积环境,圈定出该地区的有利区(图 9)。

该有利勘探区面积约为 204 km²。通过沉积和岩相古地理分析,确定牛蹄塘组沉积于深水陆棚至次深水盆地环境,页岩累计厚度在 60~200 m 之间,TOC 在 4.5% 至 6.0% 之间,同富有机质页岩的厚度分布相比,具有相似的趋势。在矿物含量方面,测得脆性矿物含量为 64.0%~81.3%,黏土矿物含量为 17.5%~30.0%;在岩石物性方面,识别出该层孔隙度在 2.0%~8.0% 之间。样品分析显示:牛蹄塘组脆性

表 3 黔南坳陷海相页岩气有利区优选参考指标

Table 3 Reference indicators for optimal selection of the favorable zones of marine shale gas in the Qiannan depression

评价参数		评价指标	调查区目的层段对应指标
			牛蹄塘组
储集性	富有机质泥页岩厚度/m	厚度稳定, 30~50	厚度稳定, 60~200
	TOC/%	>3.0	4.50~6.35
	Ro/%	1.30~3.50	2.50~2.70
	脆性矿物含量/%	>40	64.0~81.3
	黏土矿物含量/%	<30	17.5~30.0
	孔隙度/%	>2.0	2.0~8.0
	总含气量/m ³ ·t ⁻¹	≥1.0	0.09~2.7
	埋藏深度/m	1 000~4 500	0~2 500
	区域盖层厚度/m	>150	259~652
	区域盖层分布	大面积连片	大面积连片
保存条件	顶、底板厚度/m	>30	顶70~125、底10~15
	顶、底板均质程度	均质	顶板均质,底板较均质
	地层倾角/°	<30	4~48
	距目的层露头距离/km	>2	>2
	距通天断裂距离/km	≥5	0~10
	断裂密度/条·km ⁻¹	<0.5	0.2~0.5
地层压力系数		>0.9	0.91~1.06

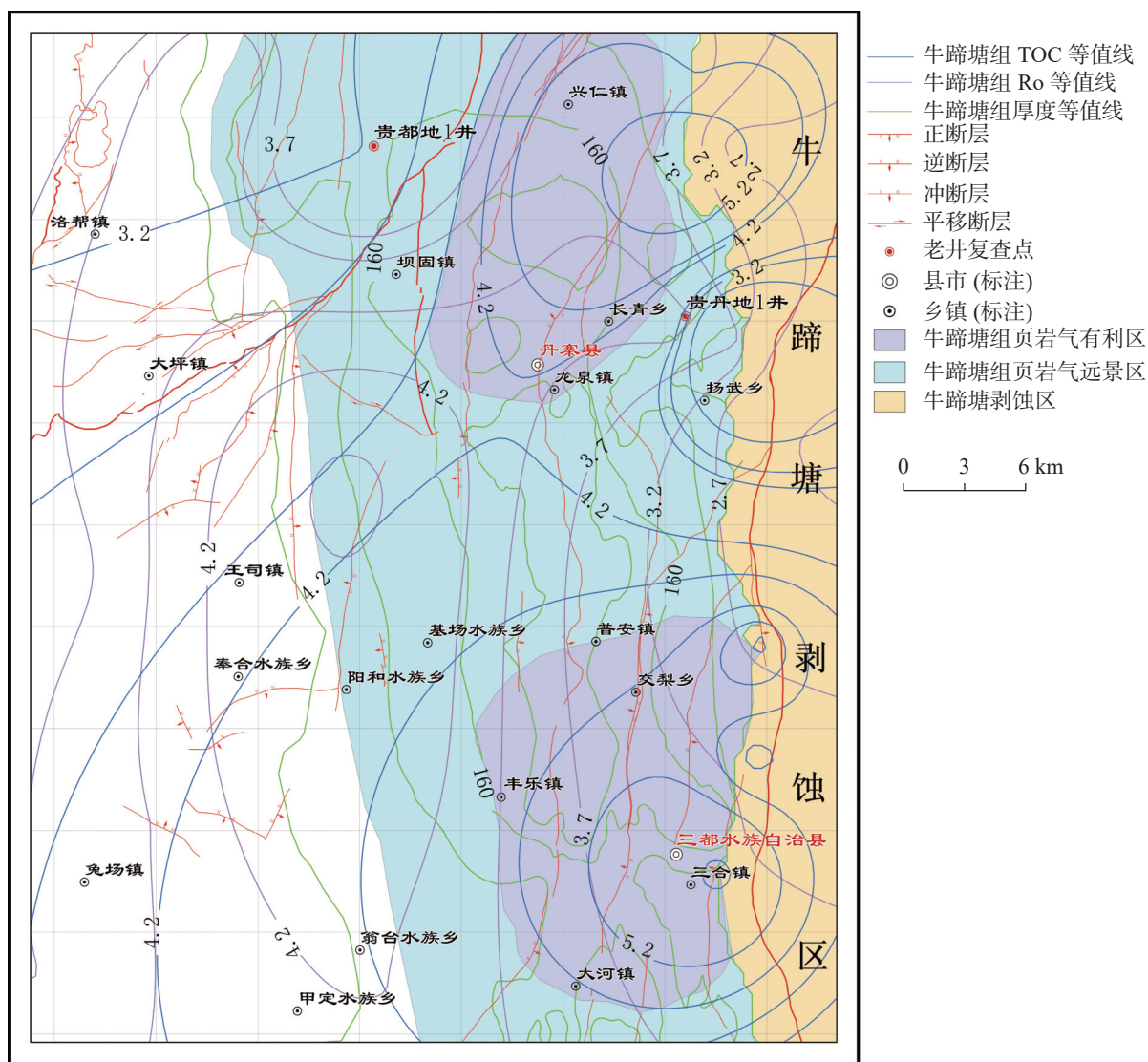


图9 研究区页岩气有利区分布图

Fig. 9 Distribution of the favorable zones of shale gas in the study area

矿物主要为石英,可增强岩石的抗压能力,保存有机孔,同时,发现石英含量与 TOC 存在明显的正相关关系。综合而言,脆性矿物、黏土矿物以及孔隙度的分布与 TOC 具有一致性,在平面上呈现由西北向东南增大的趋势。Ro 统计结果表明:研究区有机质为成熟生气状态, Ro 在 2.5%~2.7% 之间,平面上显示为从东北向西南逐渐降低的趋势。

有利区的划分与优选结果显示:牛蹄塘组页岩气目的层埋深为 1000~2500 m,含气层上覆盖层由变马冲组、乌训组、凯里组的致密岩层,如泥页岩及粉砂质泥页岩等组成,盖层累计厚度可达 259~652 m,分布广泛,横向连续性较好。同时,研究区具备较好的顶底板条件,牛蹄塘组上部地层为九门冲组灰岩,厚度为 5~15 m,以及变马冲组泥岩,含粉砂质夹层,

厚度为 65~110 m;牛蹄塘组底板由老堡组的硅质岩、炭质页岩夹层构成,厚度为 5~15 m,由于牛蹄塘组底部同样有一定厚度的炭质泥岩发育,因此可起到封堵气体,防止逸散的作用。有利区内地表地层产状在 4°~40°之间,主要集中在 10°~25°,地层总体较为平缓。此外,丹寨有利区可主探牛蹄塘组页岩气,兼探寒武系乌训组、变马冲组及震旦系陡山沱组页岩气,区域内最具勘探前景。

6 结 论

(1)丹寨地区下寒武统牛蹄塘组具备高有机碳含量 (TOC: 4.5%~6.0%)、适中的热演化程度 (Ro: 2.5%~2.7%)、中等埋深(1000~2500 m)、厚度较大的

富有机质泥页岩层(60~200 m)以及稳定的构造特征,为页岩气勘探提供了良好条件。

(2)牛蹄塘组具有较高的有机质丰度和热演化程度,具备良好的页岩气生成潜力。富有机质页岩厚度为60~200 m,整体呈现出由西北向东南逐渐增厚的趋势。此外,脆性矿物含量高,储层具备良好的改造潜力。

(3)寒武系牛蹄塘组页岩的矿物类型主要为石英类,黏土矿物次之,含少量碳酸盐矿物;页岩储集空间类型包括有机孔、无机孔和微裂缝三种类型;页岩基质孔隙度和渗透率较低,属低孔低渗页岩储层,但局部裂缝的发育可改善页岩的孔渗性。

(4)黔南坳陷丹寨地区牛蹄塘组页岩气的富集受构造保存影响显著,牛蹄塘组有机碳含量整体上较高,热演化程度整体较高,属于过成熟期,有机质类型属于I型腐泥型。丹寨有利区可主要探索牛蹄塘组页岩气,同时兼顾寒武系乌训组、变马冲组及震旦系陡山沱组的页岩气,其具有较好的页岩气潜力,有望实现页岩气勘探的突破。

参考文献

- [1] 张金川, 王香增, 李中明, 刘树根, 牛嘉亮, 袁天姝, 李兴起, 唐玄. 页岩含气量现场测试技术进展与发展趋势[J]. 地质学报, 2024, 31(1): 315-326.
- [2] 陈孝红, 李海, 苗凤彬, 罗胜元. 中扬子古隆起周缘寒武系页岩气赋存方式与富集机理[J]. 华南地质, 2022, 38(3): 394-407.
- [3] 罗超, 刘树根, 孙玮, 冉波, 雍自权, 杨迪, 张旋, 王世玉, 叶玥豪, 邓宾. 上扬子区下寒武统牛蹄塘组页岩气基本特征研究: 以贵州丹寨南皋剖面为例[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(3): 453-470.
- [4] 李世臻, 刘卫彬, 王丹丹, 张文浩, 林燕华. 中美陆相页岩油地质条件对比[J]. 地质论评, 2017, 63(Suppl.1): 39-40.
- [5] 邹才能, 潘松圻, 荆振华, 高金亮, 杨智, 吴松涛, 赵群. 页岩油气革命及影响[J]. 石油学报, 2020, 41(1): 1-12.
- [6] 陈方文, 卢双舫, 丁雪. 泥页岩吸附气能力评价模型: 以黔南坳陷牛蹄塘组吸附气含量为例[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(3): 508-513.
- [7] Bao S J, Zhai G Y, Zhou Z, Yu S F, Chen K, Wang Y F, Wang H, Liu Y M. The evolution of the Huangling uplift and its control on the accumulation and preservation of shale gas[J]. China Geology, 2018, 1(3): 346-353.
- [8] 蒙炳坤, 李靖, 周世新, 谈永, 张庆玉, 聂国权. 黔南坳陷震旦系—寒武系页岩解析气中氮气成因及来源[J]. 天然气地球科学, 2023, 34(4): 647-655.
- [9] 魏小松, 严德天, 龚银, 牛杏, 梁万乐, 伏海蛟, 刘紫璇, 杨向荣, 张宝. 鄂西—黔南地区下寒武统页岩旋回地层学研究[J]. 沉积学报, 2024, 42(3): 823-838.
- [10] 曹慧, 孙东生, 苑坤, 李阿伟, 张光哈. 黔南地区~3km 油气深孔地应力测量与构造应力场分析[J]. 中国地质, 2020, 47(1): 88-98.
- [11] Ge M N, Chen K, Chen X L, Wang C, Bao S J. 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, 2020, 3(4): 533-544.
- [12] 谢舟, 卢双舫, 于玲, 陈瑜鹏, 王民, 陈方文, 何希鹏. 泥质气源岩层内天然气扩散损失量评价: 以黔南坳陷黄页1井九门冲组页岩为例[J]. 矿物学报, 2014, 34(1): 137-143.
- LIN Yanhua. Continental shale oil geological conditions of China and the United States[J]. Geological Review, 2017, 63(Suppl.1): 39-40.
- ZOU Caineng, PAN Songqi, JING Zhenhua, GAO Jinliang, YANG Zhi, WU Songtao, ZHAO Qun. Shale oil and gas revolution and its impact[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(1): 1-12.
- CHEN Fangwen, LU Shuangfang, DING Xue. Evaluation model of gas adsorption capacity of shale: A case of adsorbed gas content from Niutitang Formation in Qiannan depression[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2015, 44(3): 508-513.
- MENG Bingkun, LI Jing, ZHOU Shixin, DAN Yong, ZHANG Qingyu, NIE Guoquan. Origin and source of helium in the resolved gas of Sinian-Cambrian shale in the Qiannan depression[J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(4): 647-655.
- WEI Xiaosong, YAN Detian, GONG Yin, NIU Xing, LIANG Wanle, FU Haijiao, LIU Zixuan, YANG Xiangrong, ZHANG Bao. Cyclostratigraphic analysis of the Lower Cambrian shales in western Hubei and southern Guizhou[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2024, 42(3): 823-838.
- CAO Hui, SUN Dongsheng, YUAN Kun, LI Awei, ZHANG Guanghan. In-situ stress determination of 3 km oil-gas deep hole and analysis of the tectonic stress field in the southern Guizhou[J]. Geology in China, 2020, 47(1): 88-98.
- XIE Zhou, LU Shuangfang, YU Ling, CHEN Yupeng, WANG Min, CHEN Fangwen, HE Xipeng. Assessment of natural gas loss from mudstone gas source rocks: An example from Jiumen-chong Formation of Huangye 1 Well, Lower Cambrian, southern

- Guizhou Sag[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2014, 34(1): 137-143.
- [13] 陈方文, 卢双舫, 丁雪. 黔南坳陷牛蹄塘组富有机质页岩生气期和生气量[J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2016, 40(3): 55-62.
- CHEN Fangwen, LU Shuangfang, DING Xue. Gas generation period and quantity of organic-rich Niutitang shale in Qiannan depression, China[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2016, 40(3): 55-62.
- [14] 淡永, 卢炳雄, 梁彬, 张庆玉, 李景瑞. 中国南方古生界碳酸盐岩发育对页岩气成藏和开发控制问题[J]. *中国岩溶*, 2018, 37(3): 343-350.
- DAN Yong, LU Bingxiong, LIANG Bin, ZHANG Qingyu, LI Jingrui. Effects of Paleozoic carbonate rock on shale gas accumulation and exploitation in Southern China[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(3): 343-350.
- [15] 朱继良, 许模, 孙建平, 康小兵, 史箫笛. 重庆涪陵页岩气勘开发区岩溶水文地质结构研究[J]. *中国岩溶*, 2020, 39(1): 1-10.
- ZHU Jiliang, XU Mo, SUN Jianping, KANG Xiaobing, SHI Xiaodi. Karst hydrogeologic structures of the shale-gas exploration and exploitation area in Fuling, Chongqing[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(1): 1-10.
- [16] 聂国权, 李小盼, 淡永, 梁彬, 张庆玉, 李景瑞, 季少聪. 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*, 2021, 40(5): 760-767.
- NIE Guoquan, LI Xiaopan, DAN Yong, LIANG Bin, ZHANG Qingyu, LI Jingrui, JI Shaocong. 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*, 2021, 40(5): 760-767.
- [17] 马龙, 徐学金, 闫剑飞, 曹凌锋, 门玉澎, 淡永, 熊国庆, 孙媛媛, 邓奇, 杨菲. 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*, 2022, 42(3): 426-443.
- MA Long, XU Xuejin, YAN Jianfei, CAO Junfeng, MEN Yupeng, DAN Yong, XIONG Guoqing, SUN Yuanyuan, DENG Qi, YANG Fei. Enrichment laws and regional selection of shale gas at the edge of palaeohigh: A case study on the Lower Cambrian Niutitang Formation on the southwestern margin of Xuefeng Uplift[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2022, 42(3): 426-443.
- [18] 何贵松, 何希鹏, 高玉巧, 张培先, 万静雅, 黄小贞. 中国南方 3 套海相页岩气成藏条件分析[J]. *岩性油气藏*, 2019, 31(1): 57-68.
- HE Guisong, HE Xipeng, GAO Yuqiao, ZHANG Peixian, WAN Jingya, HUANG Xiaozhen. Analysis of accumulation conditions of three sets of marine shale gas in Southern China[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2019, 31(1): 57-68.
- [19] Wei S L, He S, Pan Z J, Zhai G Y, Dong T, Guo X W, Yang R, Han Y J, Yang W. Characteristics and evolution of pyrobitumen-hosted pores of the overmature Lower Cambrian Shuijingtuo shale in the south of Huangling anticline, Yichang area, China: Evidence from FE-SEM petrography[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 116: 104303.
- [20] Xi Z D, Tang S H, Li J, Zhang Z Y, Xiao H Q. Pore characterization and the controls of organic matter and quartz on pore structure: Case study of the Niutitang Formation of northern Guizhou Province, South China[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2019, 61: 18-31.
- [21] 包书景, 陈科, 周志, 余谦, 陈孝红, 李世臻, 刘伟, 苑坤, 淡永, 冯兴强, 周道容. 南方公益性页岩气调查研究进展[J]. *中国地质调查*, 2023, 10(6): 1-12.
- BAO Shujing, CHEN Ke, ZHOU Zhi, YU Qian, CHEN Xiaohong, LI Shizhen, LIU WEI, YUAN Kun, DAN Yong, FENG Xingqiang, ZHOU Daorong. Progress of investigation and research on public welfare shale gas in Southern China[J]. *Geological Survey of China*, 2023, 10(6): 1-12.
- [22] 张培先. 黔中隆起及邻区下寒武统页岩气成藏特殊性分析[J]. *石油实验地质*, 2017, 39(2): 162-179.
- ZHANG Peixian. Peculiar accumulation conditions for shale gas in the Lower Cambrian in Qianzhong uplift and its periphery[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2017, 39(2): 162-179.
- [23] 卢树藩, 陈厚国. 黔南地区麻页 1 井寒武系牛蹄塘组页岩特征及页岩气勘探前景[J]. *中国石油勘探*, 2017, 22(3): 81-87.
- LU Shufan, CHEN Houguo. Shale characteristics and shale gas exploration prospect in Cambrian Niutitang Formation in Well MY-1, southern Guizhou[J]. *China Petroleum Exploration*, 2017, 22(3): 81-87.
- [24] 门玉澎, 闫剑飞, 戚明辉, 熊国庆, 马龙, 杨菲, 康建威. 黔南地区下寒武统牛蹄塘组页岩气顶底板特征研究[J]. *沉积与特提斯地质*, 2020, 40(1): 53-59.
- MEN Yupeng, YAN Jianfei, QI Minghui, XIONG Guoqing, MA Long, YANG Fei, KANG Jianwei. Effects of bottom and top layers of Niutitang Formation on preservation of shale gas in southern Guizhou[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2020, 40(1): 53-59.
- [25] 孟江辉, 潘仁芳, 陈浩, 唐小玲. 滇黔桂盆地泥盆系页岩气成藏条件及资源潜力分析[J]. *现代地质*, 2016, 30(1): 181-191.
- MENG Jianghui, PAN Renfang, CHEN Hao, TANG Xiaoling. Shale gas accumulation condition and resource potential analysis of Devonian in Dian-Qian-Gui basin[J]. *Geoscience*, 2016, 30(1): 181-191.
- [26] 张本杰, 姚玲, 罗沙, 赵芸, 孙维. 贵州省页岩气勘探开发现状与展望[J]. *天然气技术与经济*, 2016, 10(3): 57-59.
- ZHANG Benjie, YAO Ling, LUO Sha, ZHAO Yun, SUN Wei. Current status and outlook of shale gas exploration and development in Guizhou Province[J]. *Natural Gas Technology and Economy*, 2016, 10(3): 57-59.
- [27] 万梦, 苗宝, 杜继成. 黔南下寒武统牛蹄塘组页岩气成藏条件及勘探前景分析[J]. *石油地质与工程*, 2017, 31(3): 19-22, 131.
- WAN Meng, MIAO Bao, DU Jicheng. Shale gas accumulation conditions and exploration prospect in Niutitang Formation of Lower Cambrian in southern Guizhou[J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2017, 31(3): 19-22, 131.
- [28] 易同生, 赵霞. 贵州下寒武统牛蹄塘组页岩储层特征及其分布规律[J]. *天然气工业*, 2014, 34(8): 8-14.
- YI Tongsheng, ZHAO Xia. Characteristics and distribution patterns of the Lower Cambrian Niutitang shale reservoirs in

- Guizhou, China[J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(8): 8-14.
- [29] 戴传固. 贵州省区域地质志 上下册[R]. 贵州省地质调查院, 2013.
- [30] 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.
FENG Guoxiu, CHEN Shengji. The relationship between asphalt reflectance and vitrinite reflectance in rocks[J]. *Natural Gas Industry*, 1988, 8(3): 20-25.
- [31] 张志飞, 刘璠, 梁悦, 胡亚洲, 陈飞扬, 张志亮, 陈延龙, 任心宜, 姚金龙, 李国祥, 郭俊锋, 华洪. 寒武纪生命大爆发与地球生态系统起源演化[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2021, 51(6): 1065-1106.
ZHANG Zhifei, LIU Fan, LIANG Yue, HU Yazhou, CHEN Feiyang, ZHANG Zhiliang, CHEN Yanlong, REN Xinyi, YAO Jinlong, LI Guoxiang, GUO Junfeng, HUA Hong. The Cambrian Explosion of animals and the evolution of ecosystems on Earth[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2021, 51(6): 1065-1106.

Geological conditions and geochemical characteristics of favorable shale gas zones in Danzhai of the Qiannan depression

LIU Haojie¹, ZHANG Qingyu², BA Junjie², JI Shaocong², NIE Guoquan², LI Zhen²

(1. China Geological Survey, Beijing 100037, China; 2. Institute of Karst Geology, CAGS/ Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR & GZAR/International Research Center on Karst under the Auspices of UNESCO, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract The Qiannan depression is located on the southwestern edge of the Yangtze block and is an important area of shale gas resources in South China. In recent years, significant progress has been made in shale gas exploration in this region. The shale in Cambrian Niutitang formation of the Qiannan depression is widely distributed, characterized by thick layers and abundant organic matter. Shale is developed in the mature stage and possesses significant potential for shale gas exploration and development. Although some progress has been made in the studies on shale in the Qiannan region, there is still a relative lack of in-depth research on the geological conditions, soluble organic matter, and reservoir formation mechanisms of the favorable zones. By measuring and collecting samples from typical profiles and survey wells of shale gas, this study systematically analyzed the geological conditions and organic geochemical characteristics of the favorable zones in Danzhai of the Qiannan depression. It also explored the distribution and development patterns of high-quality hydrocarbon source rocks in the Cambrian Niutitang formation.

The results indicate that the Cambrian Niutitang formation in Danzhai is abundant in organic shale with a thickness of about 60 meters to 200 meters, showing an overall trend of gradually thickening from northwest to southeast. The total organic carbon content (TOC) of the Niutitang formation mainly ranges from 4.5% to 6.0%, while the organic matter maturity (R_o) predominantly varies from 2.5% to 2.7%, gradually decreasing from the northeast to the southwest. The mineral composition of shale in the Niutitang formation primarily consists of quartz, followed by clay minerals, and a small amount of carbonate minerals. The types of shale reservoir spaces include organic pores, inorganic pores, and microfractures, among which inorganic pores primarily consists of intergranular pores, intragranular pores, dissolution pores, etc. The shale matrix typically exhibits low porosity and permeability, categorizing the study area as a low porosity and low permeability shale reservoir. However, the development of local fractures can enhance both the porosity and permeability of shale. The tectonic activity has significantly influenced the preservation conditions of the strata and the degree of shale gas enrichment. Tectonic preservation continues to be a key factor affecting the shale gas enrichment of the Niutitang formation in Danzhai of the Qiannan depression. Due to relatively unfavorable enrichment conditions and the complex preservation of structures, the large-scale industrial development of shale gas in the Cambrian Niutitang formation faces significant challenges. However, the geological conditions of the shale in the Cambrian Niutitang formation in Danzhai are relatively favorable, indicating potential for further exploration of shale gas.

Key words Qiannan depression, Niutitang formation, black shale, organic geochemistry, reservoir characteristics, favorable zone of shale gas

(编辑 黄晨晖)