

doi:10.12029/gc20230317002

黔北复杂构造区超浅层页岩气勘探突破与启示——以 RX1 井为例

林瑞钦^{1,2}, 王奕松^{1,2}, 石富伦^{1,2}, 刘达冬³, 张大权^{1,2}, 冯霞^{1,2}, 周喆^{1,2},
陈祎^{1,2}, 赵福平^{1,2}, 张子亚³, 杜威^{1,2}

(1. 自然资源部复杂构造区非常规评价与开发重点实验室, 贵州 贵阳 550000; 2. 贵州省油气勘查开发工程研究院, 贵州 贵阳 550000; 3. 中国石油大学(北京)非常规油气科学技术研究院, 北京 昌平 102200)

摘要:【研究目的】通过分析 RX1 井五峰组-龙马溪组页岩有机地化、物性和孔隙特征, 明确湄潭向斜页岩气成藏基础地质条件, 探讨盆外复杂构造区超浅层页岩气勘探开发潜力。【研究方法】本次研究利用黔北地区 RX1 井的岩心, 开展现场解吸、地化测试、现场压裂效果以及储层特征等综合实验分析, 结合邻区勘探资料, 探索埋深、构造保存环境对黔北超浅层页岩气富集的影响。【研究结果】RX1 井五峰组-龙马溪组优质烃源岩段厚度 14.78m, 总有机碳含量均值 4.43%, 有机质成熟度处于 2.36%~2.78%, 干酪根类型为 II₁ 型, 具备良好的生烃基础; 优质页岩段孔隙度均值为 3.30%, 脆性矿物含量高, 平均脆性指数达 69, 为页岩气提供了良好的储集空间; 井区构造相对稳定, 地层倾角小, 整体页岩气基础地质条件好, 获得良好含气性显示及压裂效果。【结论】RX1 井勘探实践的成功, 证实了盆外复杂构造区目的层埋深 1000m 以浅的向斜构造单元内, 页岩气可富集成藏, 具有较好的建产潜力, 可作为下一步有利勘探目标。结合区域地质资料分析认为, 受新生代构造叠加改造形成的压扭性构造系统是盆外复杂构造区页岩气富集成藏的重要场所, 压扭性构造控藏作用应是下一步勘探研究的重点。

关键词: 超浅层页岩气; 五峰组-龙马溪组; 盆外复杂构造区; RX1 井; 油气勘查工程; 黔北

创新点: 本文从页岩气储层基本特征入手, 分析了 RX1 井超浅层页岩气成藏条件, 探索黔北地区超浅层页岩气勘探潜力。提出盆外复杂构造区目的层埋深 1000m 以浅的向斜构造单元, 可作为下一步有利勘探目标, 压扭性构造控藏作用应是下一步勘探研究的重点。

Breakthrough and revelation of ultra-shallow shale gas exploration in complex structural area of northern Guizhou: Taking Well RX1 as an example

LIN Ruiqin^{1,2}, WANG Yisong^{1,2}, SHI Fulun^{1,2}, LIU Dadong³, ZHANG Daquan^{1,2}, FENG Xia^{1,2}, ZHOU Zhe^{1,2}, CHEN Yi^{1,2}, ZHAO Fuping^{1,2}, ZHANG Ziya³, DU Wei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Unconventional Natural Gas Evaluation and Development in Complex Tectonic Areas, Ministry of Natural Resources, Guiyang, Guizhou, 550000 ; 2. Guizhou Engineering Research Institute of Oil&Gas Exploration and Development, Guiyang, Guizhou, 550000 ; 3. Institute of Unconventional Petroleum Science and Technology, China University of Petroleum (Beijing), Changping, Beijing 102200)

基金项目: 黔北试验区页岩气成藏控制因素研究与勘探实践(208-9912-JBN-L1D7)资助。

作者简介: 林瑞钦, 男, 1993 年生, 学士, 助理工程师, 主要从事页岩气地质及储层评价等方面研究工作; E-mail: krlinrq@163.com。

通讯作者: 杜威, 男, 高级工程师, 主要从事构造演化及其控油气作用研究; E-mail: duweiletian@126.com。

Abstract: [Objective] By analyzing the organic geochemistry, physical properties, and pore characteristics of the Wufeng-Longmaxi Formation in well RX1, the basic geological conditions of the Fuyan yansynclinal shale gas accumulation are clarified, and the exploration and development potential of ultra-shallow shale gas in the complex structural area outside the basin is discussed. **[Methods]** This study utilizes the core of Well RX1 in northern Guizhou to conduct comprehensive experimental analysis such as on-site desorption, geochemical testing, on-site fracturing effect, and reservoir characteristics. In combination with exploration data from neighboring areas, it explores the impact of burial depth and the structural preservation environment on the enrichment of ultra-shallow shale gas in northern Guizhou. **[Results]** The results show that the thickness of the high-quality hydrocarbon source rock section in the Wufeng-Longmaxi Formation of the RX1 well is 14.78m, the average content of total organic carbon is 4.43%, the maturity of organic matter is between 2.36% and 2.78%, and the kerogen type is II₁, which has a good hydrocarbon generation basis; the average porosity of high-quality shale is 3.30%; and the content of brittle minerals is high, with an average brittleness index of 69, which provides a good reservoir space for shale gas. **[Conclusions]** The successful exploration practice of well RX1 confirms that shale gas can be enriched in the synclinal structural unit with a depth less than 1000m in the target layer of the complex structure area outside the Sichuan basin, which has good potential for construction and production and can be used as a favorable exploration target in the next step. Based on the analysis of regional geological data, it is believed that the compression-torsional structural system formed by the superposition and transformation of Cenozoic structures is an important place for shale gas accumulation in complex structural areas outside the basin. The reservoir-controlling effect of the compression-torsional structural system should be the focus of the next round of exploration and research.

Key words: ultra-shallow shale gas; Wufeng-Longmaxi Formation; complex structural area outside the basin; Well RX1; oil and gas exploration engineering; northern Guizhou Province

Highlights: Starting with the basic characteristics of shale gas reservoir, this paper analyzes the conditions of ultra-shallow shale gas reservoir formation in the RX1 well and explores the exploration potential of ultra-shallow shale gas in northern Guizhou. It is proposed that the target layer buried in the syncline structural unit with a depth of less than 1000m in the complex structural area outside the basin can be used as the next favorable exploration target. The reservoir-controlling effect of compressional and torsional structure should be the focus of the next exploration research.

About the first author: Lin Ruiqin, male, 1993, bachelor of engineering, assistant engineer, mainly engaged in shale gas geology and reservoir evaluation research; E-mail: krlinq @ 163.com.

About the corresponding author: Du Wei, male, senior engineer, mainly engaged in structural evolution and its effect on hydrocarbon accumulation; E-mail: duweiletian@126.com.

Fund support: Supported by the research and exploration practice on controlling factors of shale gas accumulation in Northern Guizhou (208-9912-JBN-L1D7).

1 引言

以页岩气为代表的非常规油气快速发展,拓展了油气资源勘探开发类型与资源量,极大丰富和革新了石油天然气地质理论(贾承造, 2017; 马永生等, 2018; 邹才能等, 2010; 2020)。扬子地区古生界海相富有机质页岩具备良好的生烃条件,是国内最现实的页岩气区(贾承造等, 2012)。近年来,我国扬子地区页岩气勘探开发取得了以长宁-威远、涪陵气田等为代表的一系列重大突破,开拓了我国陆上天然气勘探新局面(Zhai et al., 2018a; 赵文智等, 2020; 邹才能等, 2022)。伴随勘探开发地不断深入,前人对以四川盆地为代表的典型页岩气成藏地质特征开展了深入的研究,邹才能等提出了页岩气具有连续聚集,“源储共生,油气大面积连续分布,圈闭界限不明显”的特点(邹才能等, 2012; 2013);郭旭升等建立了南方海相页岩气“二元富集”模型(郭旭升, 2014);聂海宽等提出“源-盖控藏”的认识(聂海宽等, 2016)。在盆外/盆缘的复杂构造区,翟刚毅等基于典型气藏的解剖,提出了“四层楼”富集模式,总结了南方海相页岩气富集与聚集规律“三要素”(翟刚毅等, 2017; Zhai et al., 2018b);朱立军等对被动陆缘页岩气富集条件进行了初步讨论(朱立军等, 2019)。前人有关页岩气成藏认识中,多认为埋深是影响页岩气成藏过程的关键因素之一(聂海宽和张金川, 2012; 李昌伟等, 2015; 郭旭升等, 2017),较大的埋深有利于页岩气保存和富集(张金川等, 2009; 方志雄和何希鹏, 2016; 黄仁春等, 2017; 天工, 2018; 龙胜祥等, 2018; 王晓蕾, 2020)。对于埋深 2000m 以浅,特别是埋深 1000m 以浅的页岩气藏,一般都认为其具有“三低一差”(低含气量、低压力、低产量、保存条件差)的特点(何勇等, 2021)。2017 年以来,复杂构造区浅层页岩气勘探取得重大进展,昭通地区太阳背斜的 Y1 和 Y102 井在目的层埋深小于 1000m 地区获得工业气流(梁兴等, 2020)。太阳背斜浅层页岩气的求产成功,为复杂构造区勘探工作提供了启示:复杂构造区页岩气的“甜点区”埋深范围有待进一步拓展。同时也对勘探工作提出了新问题:盆缘太阳背斜的成功能否在盆外更大的范围内推广?在盆外地区,背斜构造单元的五峰组-龙马溪组地层大多已剥蚀殆尽,残留的五峰组-龙马溪组地层多分布于向斜构造单元内,参考太阳背斜经验,埋深较浅的向斜构造单元是否也有页岩气富集?结合地球化学、沉积相等分析,认为黔北五峰组-龙马溪组发育一定厚度优质页岩,有机质丰度高、类型好、热演化程度较高、储集物性以脆性矿物含量高,构造相对稳定,地层倾角小,具备较好的页岩气成藏基础地质条件;RX1 井的勘探实践证明,盆外复杂构造区目的层埋深 1000m 以浅的向斜构造单元内页岩气也可富集成藏;受新生代构造叠加改造形成的压扭性构造系统是盆外复杂构造区页岩气富集成藏的重要场所,压扭性构造控藏作用应是下一步勘探研究的重点。

2 区域基础油气地质特征

黔北地区位于上扬子陆块东部、四川盆地东南缘、江南造山带西侧的盆外复杂构造区(图 1)。区域自新元古代以来受多期、多方向构造事件影响;现今构造是一套在华南印支构

造基础上, 起始于印支中晚期而主要形成于燕山期并为后期构造改造的叠加构造体系(许靖华等, 1987; 任纪舜等, 1990; 董树文等, 1994; 郭令智, 2001; 张岳桥等, 2011; 2012; 舒良树, 2012; 张国伟等, 2013)。印支中晚期至燕山期, 贵州东南部的雪峰陆内变形构造系统活动, 由南东方向始, 逐渐形成一套主体呈指向 NW 的逆冲推覆构造为骨架的 NE-NNE 近南北向的弧形构造系统; 东南部以 NE 向构造为主, 黔北地区以 NNE 或 SN 向构造为主, 由东向西, 相对宽缓的背斜和相对紧闭的向斜相继发育, 表现为典型的“隔槽式”褶皱特征, 形成了黔北侏罗山式构造格局(舒良树, 2012; 解国爱等, 2013; 张国伟等, 2013)。新生代以来, 受青藏高原隆升、生长远程效应影响, 四川盆地不断向东南方向推挤(刘和甫等, 1994; 刘树根等, 1995; 2003; 贾东等, 2003; 张培震等, 2008; 王二七等, 2009; 许志琴等, 2011; 何登发等, 2011; 郭召杰等, 2020), 区域燕山期形成的 NNE 或 S-N 向构造格架受到叠加改造, 特别是在区域西北部, 形成了一系列枢纽向东弯曲的压扭性叠加褶皱系统。

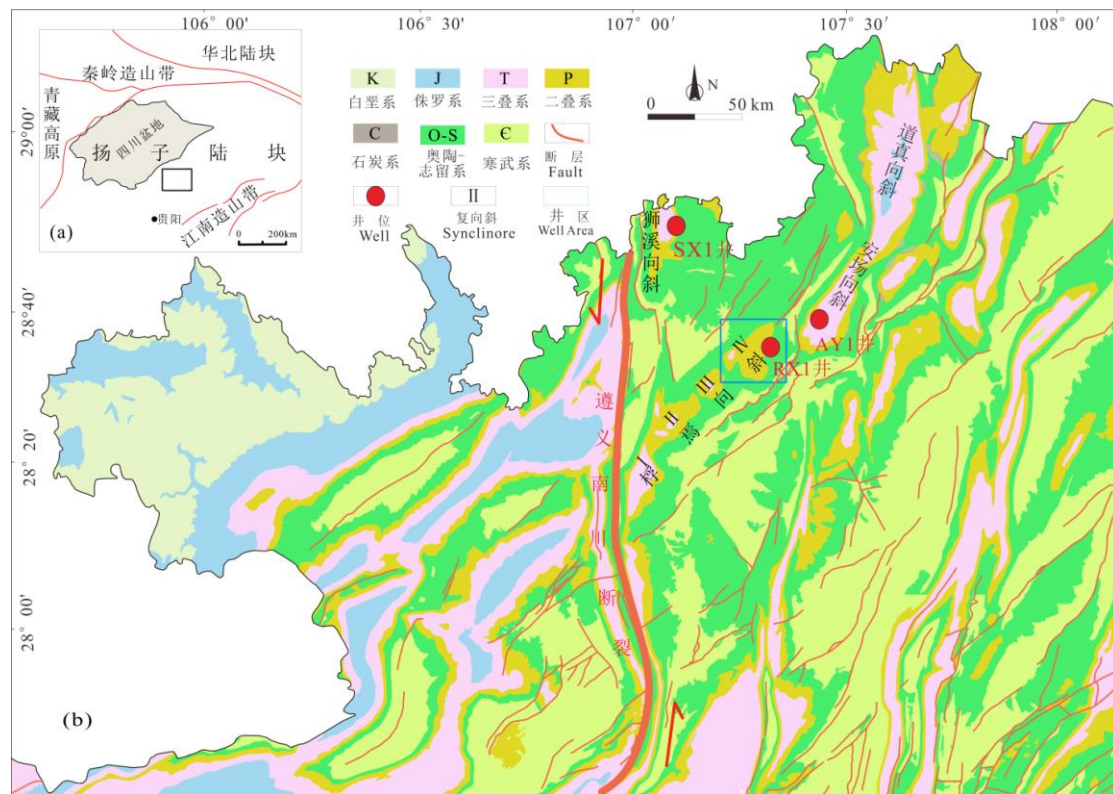


图 1 研究区地质简图

(a) 黔北地区构造纲要平面图 (据魏国齐等, 2019 修改); (b) 黔北地区地质简图

Fig. 1 Geological sketch of the study area

(a) Structural Outline Plan of Northern Guizhou (revised according to (Wei Guoqi et al., 2019));

(b) Geological sketch map of Northern Guizhou

遵义-南川断裂以东 (图 1), 区域上出露寒武系至侏罗系地层, 以海相沉积为主。寒武系地层岩性以碳酸盐岩为主, 奥陶系主要为灰岩及泥岩。志留系下统在该区出露较全, 岩性三分, 下部龙马溪组、新滩组以泥页岩及碎屑岩为主; 中部松坎、石牛栏组以碳酸盐岩为主, 夹少量黏土岩; 上部韩家店组为黏土岩及少量碎屑岩。

桴焉向斜位于研究区北部，西侧为遵义-南川左行走滑断裂，东北侧紧邻安场向斜，自南向西向北东由桴焉 I、II、III、IV号复向斜共同组成（图 1）。向斜总体呈 NE 走向，向斜核部出露最新地层为三叠系夜郎组，向两翼依次为：二叠系合山组、二叠系茅口组、栖霞组、志留系韩家店组、石牛栏组、松坎组、新滩组、龙马溪组、奥陶系五峰组、宝塔组、十字铺组、湄潭组、红花园组、桐梓组。从平面上看，桴焉 I 号复向斜紧邻遵义南川断裂，受断裂影响，向斜西翼较为紧闭，东翼较为宽缓；桴焉构造内部及邻区以广泛发育 NE 或 NNE 向压扭断裂；局部发育近 SN 向断裂，以逆冲性质为主；桴焉 IV 号构造（图 2）东部发育一组 NW 向压扭性断裂（F2、F3），推测为走滑相关的调节性断裂。桴焉 IV 号复向斜较为完整，RX1 井位于该复向斜东部，复向斜枢组长约 15km，NNE 走向，核部出露最老地层为二叠系上统合山组，地层整体平缓，倾角约 10°。

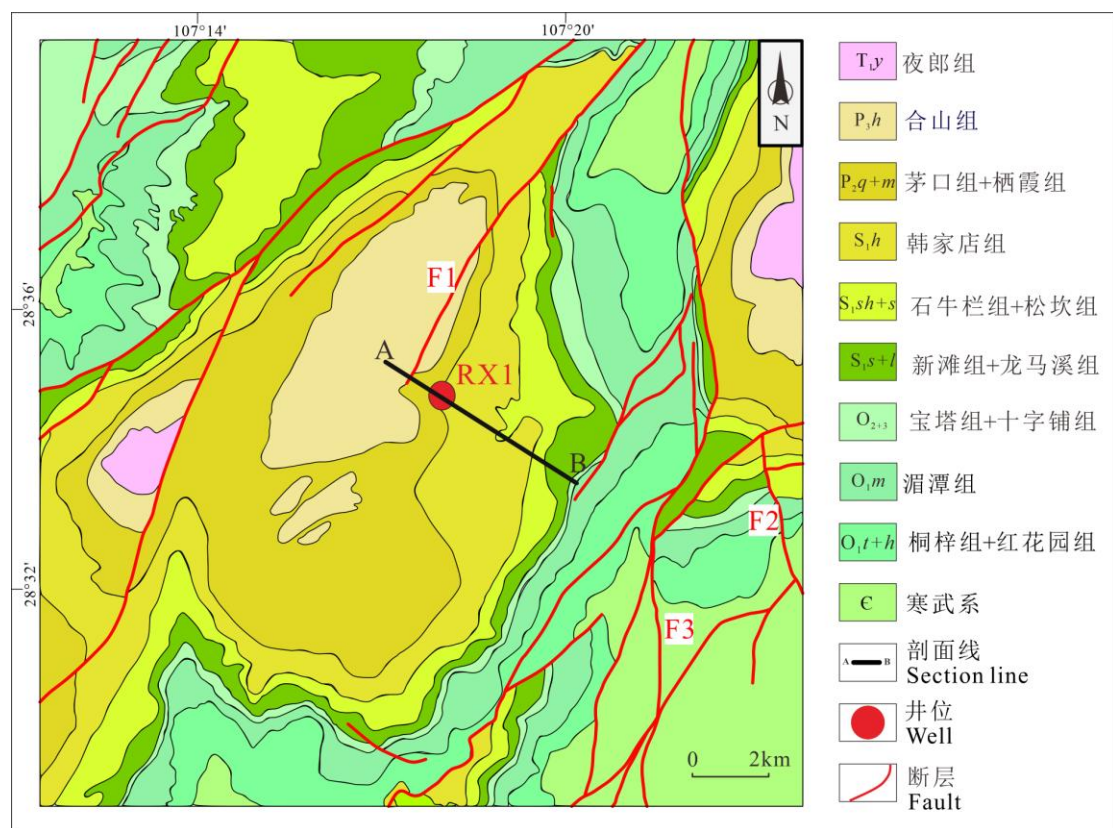


图 2 RX1 井区地质图

Fig. 2 Geological map of RX1 well area

黔北地区发育有两套重要的烃源岩层系，分别为寒武系牛蹄塘组和上奥陶统五峰组（O_{3w}）-下志留统龙马溪组（S_{1l}）。上奥陶统五峰组（O_{3w}）-下志留统龙马溪组（S_{1l}）是目前区域上的页岩气主力产层。晚奥陶-早志留世龙马溪期，黔北地区处于浅海环境，发生大规模海侵事件(戎嘉余等, 2011)，区域上富有机质页岩广泛沉积。平面上，由南东向北西优质页岩厚度逐渐增大（图 3），水体逐渐加深，为浅水陆棚-深水陆棚过渡沉积。狮溪-道真一线以北龙马溪一亚段厚度可达 30m 以上，桴焉-安场一带厚度在 20~25m。根据笔石发育情况，陈旭等自下而上将奥陶统五峰组（O_{3w}）-下志留统龙马溪组（S_{1l}）分为 13 个笔石带（小层），

分别是 WF1-WF4 及 LM1-LM9，其中 WF2- WF3 和 LM2-3 到 LM6 生烃潜力最佳，是页岩气开发最有利层位(陈旭等, 2015; 2017)。五峰组岩性主要为黑色碳质页岩或碳质黏土岩，局部夹粉砂质黏土岩、硅质岩，含细粒黄铁矿，数层极薄层斑脱岩；龙马溪组岩性主要为黑色碳质泥岩、含碳质粉砂质泥岩，发育大量笔石(陈旭等, 2017) (图 4)。五峰组-龙马溪组有机质类型以 I 型和 II₁ 型干酪根为主，TOC 含量在 0.65%~8.04%，一般超过 4%；成熟度高，Ro 分布在 1.82%~2.23%之间(王奕松等, 2021)。

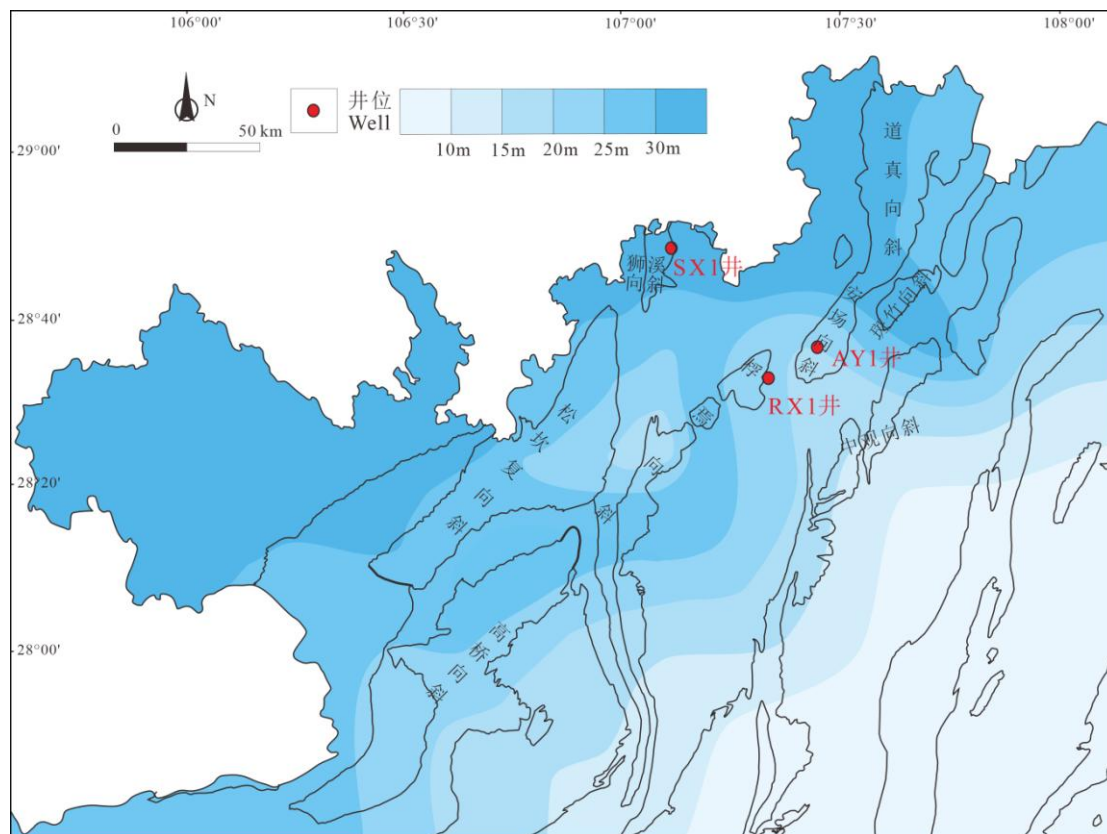


图 3 黔北地区下志留统龙马溪组一亚段残余厚度等值线图

Fig. 3 Residual thickness map of the first sub-segment of Longmaxi Formation of Lower Silurian in Northern Guizhou



图 4 RX1 井龙马溪组笔石

Fig. 4 Graptolite fossils of Longmaxi Formation in Well RX1

黔北地区页岩气勘探工作始于 2010 年左右，2012 年由原贵州省国土资源厅牵头，对贵

州页岩气资源开展调查评价。此次调查评价共计实施页岩气调查井 26 口，开展了二维电法 1229 点、音频大地电磁测深 6800km。落实了 7 套富含有机质页岩层系（分别为下寒武统牛蹄塘组、变马冲组、下志留统龙马溪组、中泥盆统火烘组、下石炭统旧司组/打屋坝组、中二叠统梁山组和上二叠统龙潭组页岩层系）的大体空间分布；优选了 26 个页岩气分布有利区。经计算，全省页岩气地质资源总量约 $135395.12 \times 10^8 \text{m}^3$ ，其中，有利区页岩气地质资源量 $92155.44 \times 10^8 \text{m}^3$ (朱立军等, 2019)。2015 年，中国地质调查局油气资源调查中心、华电集团在贵州北部正安县安场构造部署的安页 1 井，裸眼中途测试最大初始产量 42.01 万方/日，平均产量 9.50 万方/日，证明在盆外复杂构造区页岩气同样具有良好的勘探前景。2017 年 8 月，黔北正安页岩气勘查区探矿权成功拍卖，作为我国首宗页岩气探矿权拍卖案例，对我国油气体制改革具有重要意义，也是迄今贵州省油气相关工作的标志性成果。黔北地区在复杂构造区勘探程度相对较高。区内以安场向斜 AY1 井位代表的勘探实践(翟刚毅等, 2017; 张金川等, 2018)，实现了我国陆上盆外页岩气勘探的重大进展，现已在安场形成日均 20 万方的工业产能；据新闻报道，北部的道真向斜获得页岩气工业发现，初步评价地质资源量约 2138 亿立方米，控制地质资源量 975 立方米，预计建产后可达日均 12 万方产能。截至目前，黔北地区绝大多数页岩气调查井勘探目的层埋深在 1000 米以上，超浅层 (<1000m) 页岩气研究程度相对较低。

3 数据及方法

本研究在桴焉向斜 RX1 井场进行现场解吸实验和压裂试验，用于评价页岩含气性，并采集页岩样品，开展 TOC、孔隙度、有机质成熟度、矿物成分分析、氩离子抛光扫描电镜和等温吸附等室内实验，用于获取物性、地化等关键性指标。

现场解吸实验由重庆泛嘉晟禾工程技术检测有限公司完成。采用高精度现场解析仪现场测定岩心解吸气量，计算损失气量；采用页岩残余气测试仪测定岩心残余气量；采用 GC4000A 气相色谱仪测定气体组分。具体操作步骤依据《SY/T 6940-2020 页岩含气量测定方法》及《GB/T 13610-2020 天然气的组成分析气相色谱法》。

压裂试验由四川冲达油气技术服务有限公司施工。现场采用清水压裂液，由 3 台三一牌 2500 型压裂车直接串连到 KQ65/70 井口进行压裂，1 台杰瑞系统仪表车采集数据。

RX1 井样品测试分析在中国石油大学（北京）油气资源与探测国家重点实验室完成。TOC 测试仪器为 LECO CS230 碳硫分析仪，具体操作步骤依据《GB/T 19145-2003 沉积岩中总有机碳的测定》；孔隙度测试仪器为 PoroPDP-200 覆压孔渗仪，具体操作步骤依据《岩心分析方法 SY/T 5336-2006》；有机质成熟度测试仪器为 MPV-SP 显微光度计、多功能显微镜，具体操作步骤依据《沉积岩中镜质体反射率测定方法 SY/T 5124-2012》；X 射线衍射实验用于测定岩样的矿物组成，实验仪器为 D/max-2500 X 射线衍射仪，具体操作步骤依据《SY/T 5163-2010 沉积岩中黏土矿物和常见非黏土矿物 X 射线衍射分析方法》；氩离子抛光扫描电镜观察测试仪器为 Crossbeam 540，具体操作步骤依据《SY/T 5162-2021 岩石样品扫描电子显微镜分

析方法》；等温吸附实验测试仪器为 RUBOTHERM Isosorp-Hpl1Static 高压等温吸附仪，具体操作步骤依据《GB/T 35210.1-2020 页岩甲烷等温吸附测定方法第 2 部分：重量法》。

4 RX1 井基础油气地质特征

4.1 钻遇地层及优质页岩厚度

如 RX1 井地质剖面图所示（图 5，剖面位置见图 2），RX1 井开孔层位为志留系韩家店组，先后钻遇石牛栏组、松坎组、新滩组、龙马溪组和上奥陶统观音桥组、五峰组、宝塔组（未穿），完钻井深 788.48m。钻遇黑色页岩 22.28m，其中含气量大于 1.7m³/t 页岩段 17.59m，参考《NB T 10398-2020 页岩气储层评价技术规范》，划分出 TOC>3% 优质页岩段 14.78m。

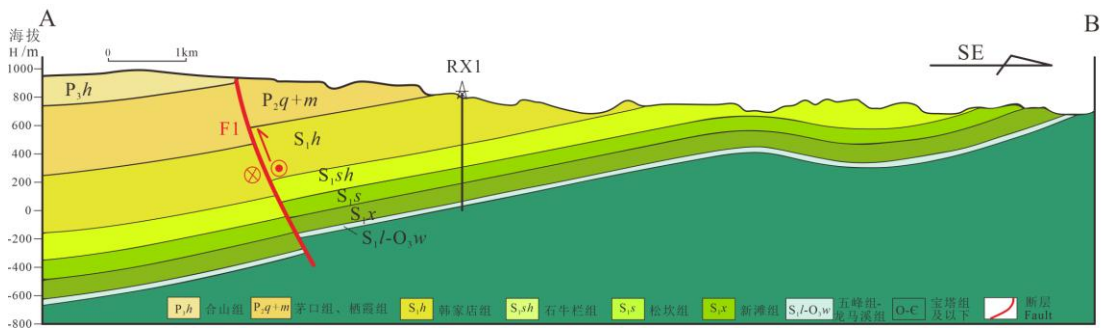


图 5 RX1 井地质剖面图

Fig. 5 Geological Profile of Well RX1

4.2 有机地化特征

油气勘探的一个基本问题是如何评价潜在烃源岩的油气生成潜力(Peters, 1986)。油气有机地化是评价烃源岩及含油气系统的重要手段，对于自生自储的页岩尤为重要。本研究通过有机质类型、有机质丰度与有机质成熟度三项基础指标对烃源岩地球化学特征进行表征。

4.2.1 富有机质页岩有机质类型

页岩中的不同的有机质类型会导致其烃源岩的质量不同，主要是由于有机质来源不同，因而生成油气的能力也有所不同，有机质类型控制着烃源岩生成油气能力(Dembicki, 2009)。此外有机质类型还影响烃源岩对天然气的吸附聚集能力(Loucks et al., 2009)，其类型划分是一般以干酪根元素分析法为基础。

表 1 RX1 井五峰组-龙马溪组页岩干酪根显微组分组成

Table 1 Composition of kerogen in Wufeng-Longmaxi Formation of Well RX1

编号	深度/m	腐泥组	壳质组	镜质组	惰质组	类型		δ ¹³ C PDB /‰
		/%	/%	/%	/%	TI	类型	
		腐泥无定形体	孢粉体	正常镜质体	丝质体			
RX1-1	747.52	266	3	5	26	79.3	II ₁	-30.19
RX1-2	755.08	265	4	6	25	79.2	II ₁	-30.29

RX1-3	761.58	267	2	4	27	79.3	II ₁	-30.14
-------	--------	-----	---	---	----	------	-----------------	--------

RX1 井五峰组-龙马溪组干酪根显微组分中，以腐泥组组分为主，其次为惰质组组分，壳质组及镜质组组分含量较低，其中腐泥组中腐泥无定形体的相对含量为 88.3%~89.0%；干酪根类型指数为 79.2~79.3，干酪根类型属于 II₁ 型。干酪根碳同位素值为-30.14‰~-30.29‰,平均值为-30.21‰，表明该页岩中有机质类型属腐泥型有机质（表 1）。

4.2.2 富有机质页岩有机质丰度

有机碳含量反映了沉积物中有机物总量和烃源岩的生烃能力，是衡量有机质丰度、评价烃源岩最常用的指标之一(Ronov, 1958; Jarvie, 1991; Dembicki, 2009)。它不仅控制着泥页岩的化学性质，更控制着泥页岩的含气量(聂海宽和张金川, 2012)。岩心测试分析显示 RX1 井富有机质页岩 TOC 在 3.99%~5.18%，均值 4.43%（图 6），与黔北地区普遍大于 2%的认识相符(朱立军等, 2019; 梁兴等, 2020)。与安页 1 井（TOC 平均值 2.65%）、斑竹 1 井（TOC 平均值 2.33%）、狮溪 1 井（TOC: 2.79%~4.77%）等黔北典型井对比，TOC 处于较高水平(林瑞钦等, 2022; 王奕松等, 2022)。综合而言 RX1 井有机质丰度优势突出，显示良好的生烃能力。

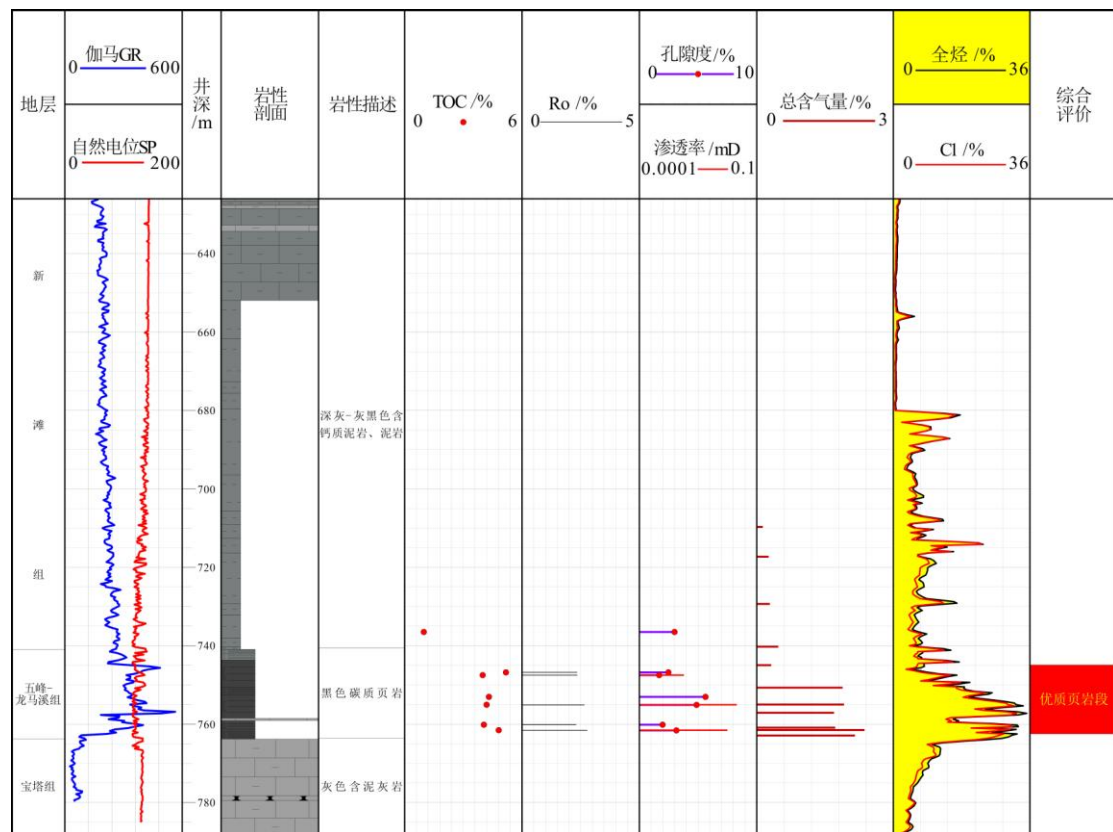


图 6 RX1 井五峰组-龙马溪组综合柱状图

Fig. 6 Comprehensive column map of Wufeng Formation - Longmaxi Formation of Well RX1

4.2.3 富有机质页岩有机质成熟度

碳质泥岩中干酪根的成熟度可以用来预测生烃潜能，并能影响到碳质泥岩中游离气的吸附量。RX1 井有机质成熟度处于 2.36%~2.78%之间，均值 2.46%，处于过成熟早期阶段，有利于烃类气体生成（图 6）。

总体而言，RX1 井发育一定厚度的富有机质页岩，其有机质类型好，丰度高，成熟度适

中，是有利的烃源岩。

4.3 物性及孔隙特征

物性分析表明，RX1 井五峰组-龙马溪优质页岩孔隙度 1.69%~5.63%，均值 3.30%；渗透率 0.038~0.083mD，均值 0.065mD，整体表现为低孔特低渗的特征（图 6）。由于泥岩孔隙直径一般在微米级以下，普通光学显微镜无法观测，通常利用扫描电镜来测定岩性以及获取样品中孔隙的类型和位置等基本数据(Loucks et al., 2009; 2012; Lühr et al.,2015)。电镜观察发现，RX1 微晶石英、白云石、填隙状有机质相间分布（图 7a, 7b）；有机质呈碎块状、填隙状（图 7d, 7f）。孔隙类型以粒间孔和有机质孔为主，粒内溶蚀孔较少发育，常见黄铁矿晶间孔被有机质充填（图 7e）。有机质孔主要分布于无机矿物颗粒之间的有机质内部，有机质孔隙或被黏土包裹，呈带状、蜂窝状分布（图 7c），同时也可见有机质收缩缝（图 7a），有机质孔隙直径以几十纳米的有机质孔最多，孔隙连通性好。粒间孔主要发育于脆性矿物接触处，多呈狭缝型或楔形，孔径在 0.5~2 μm ，连通性较好，是有机质有利赋存空间。

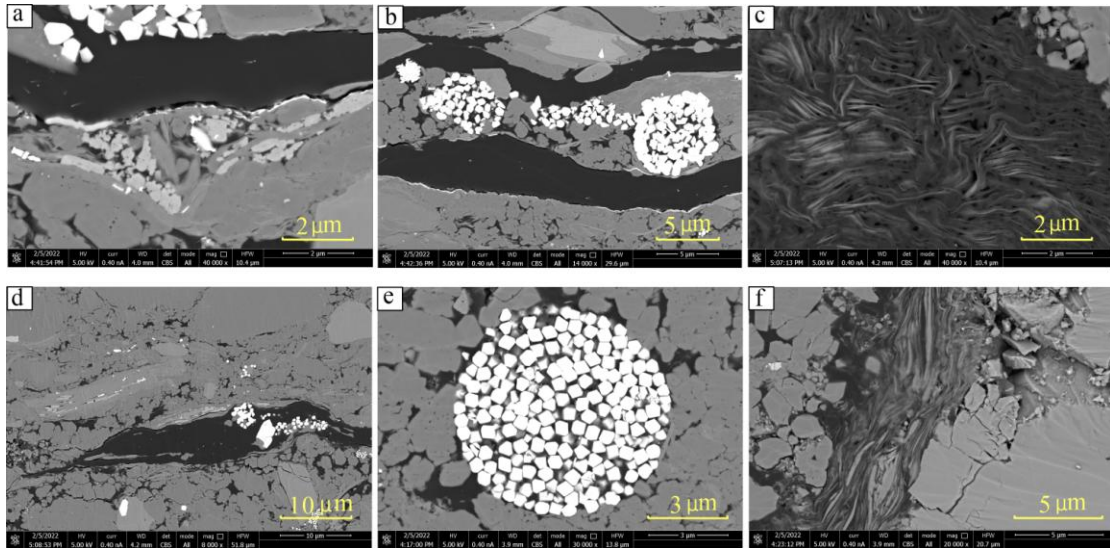


图 7 RX1 井富含有机质页岩电镜扫描照片

a,b-样品 RX1-1, 747.52m, S_{1l} , TOC=3.99%; c,d-样品 RX1-2, 755.08m, S_{1l} , TOC=4.21%; e, f-样品 RX1-3, 761.58m, O_3w

Fig. 7 Scanning electron micrograph of organic shale in Well RX1

a,b- Sample RX1-1, 747.52m, S_{1l} , TOC=3.99%; c,d- Sample RX1-2, 755.08m, S_{1l} , TOC=4.21%; e, f- Sample RX1-3, 761.58m, O_3w

4.4 矿物含量

RX1 井五峰组-龙马溪组样品 X 射线衍射全岩分析结果显示：五峰组-龙马溪组黑色页岩碎屑矿物 42.8~78.1%（长石+石英），均值 58.8%；自生矿物主要为方解石、黄铁矿、白云石和少量硬石膏，其中方解石、黄铁矿、白云石含量 4.1~13.5%，均值 10.1%，硬石膏含量在 0.5~1.1%之间；黏土矿物 11.2~45.8%（图 8）。五峰组-龙马溪组的矿物组成与岩性密切相关，

矿物组成以碎屑矿物为主，脆性较高，其次为黏土矿物和自生矿物。

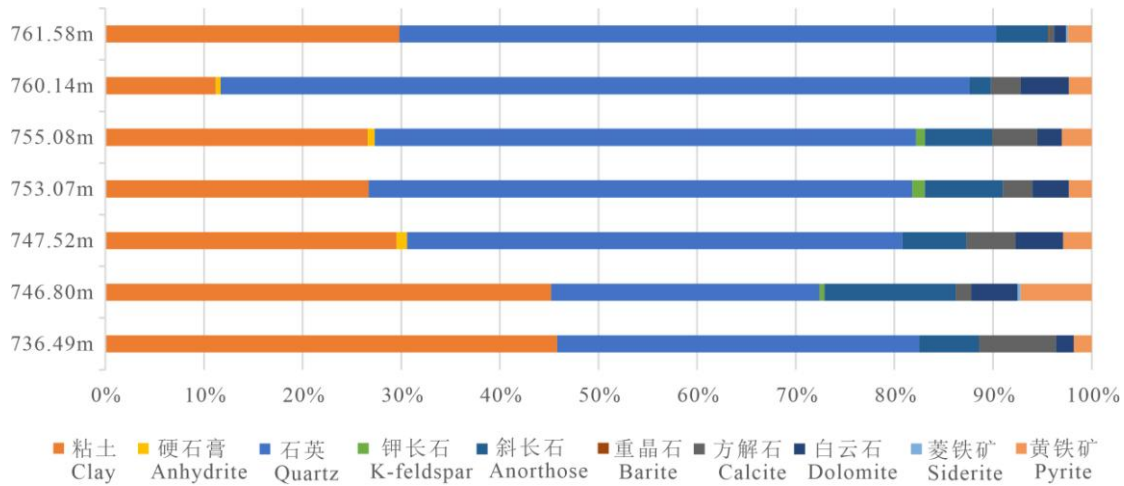


图 8 RX1 井富有机质页岩全岩矿物组分图

Fig. 8 Percentage of whole rock composition of organic shale in Well RX1

按照《NB/T 10248-2019 页岩脆性指数测定及评价方法》计算，RX1 井黑色页岩段平均脆性指数高达 69，为较好等级。可见，研究区五峰组-龙马溪组含气页岩具有较好的脆性，具较好的破裂潜力。

5 含气性特征

现场岩心含气量测试中，RX1 井下部富有机质页岩段解吸含气量 1.70~2.37m³/t，平均含气量 1.96m³/t，甲烷组分 91.19%~96.22%，平均甲烷含量 95.05%。吸附实验显示，在 25℃条件下总含气量在 4.49~5.22m³/t，平均为 4.78m³/t，说明研究区泥页岩具有较好的页岩气富集能力。另外，该井在 740~763m 井段，实施小型清水直井压裂（图 9），采用定深度抽吸，抽深控制在 700m，套压压降控制为 0.5MPa，针阀开度 1/4 圈，12 小时产气 810m³，折合日产气量 1620m³，表明该地区超浅层页岩气具有较大的建产潜力。



图 9 RX1 井压裂现场及点火照片

Fig. 9 Fracturing site and ignition photos of Well RX1

6 讨论

(1) 受新生代构造叠加改造形成的压扭性构造系统是盆外复杂构造区页岩气富集的主要场所, 新生代构造改造强度相对较弱的地区有利于页岩气富集。

环青藏高原盆山体系东段, 褶皱-冲断改造的陆内变形从造山带向克拉通方向推进(贾承造等, 2013)。GPS 速度场显示至少中新世以来, 无论是盆地本身, 还是盆外复杂构造区总体都由西向东运动(张培震等, 2003; 2004; 郑文俊等, 2019; 王洋等, 2022)。四川盆地前陆断带的构造地质建模和平衡恢复分析表明, 盆地自西向东的构造缩短率逐步减小(李本亮等, 2011; 贾承造等, 2013), 指示盆外复杂构造区受青藏高原生长远程效应相对川西较弱, 新生代以来的山前冲断-褶皱构造并不发育。由于没有相对刚性的克拉通基底, 复杂构造区对青藏高原生长远程效应的响应方式与环青藏高原盆山体系东段的古造山带类似——以压扭性构造的广泛发育为主。在涪陵焦石坝地区, 焦石坝构造由北东向和南北向两组断裂体系控制, 呈菱形断背斜形态, 燕山晚期的北西向挤压和其后的南北向走滑作用有利于超压的形成和保存, 压扭作用使得构造保存条件总体较好(郭彤楼和张汉荣, 2014; 黄仁春等, 2017)。在太阳昭通地区, 近东西向的压扭性走滑断裂对早期近东西向复背斜进行叠加改造, 破坏了原有背斜的完整性, 封闭性较好的压扭性断裂替代原有向斜边界, 对气藏起到了良好的侧向封堵作用, 形成三维整体封闭体系(梁兴等, 2020)。在黔北湄潭地区, 现今侏罗山式构造格架于燕山期形成, 此时区域上以逆冲推覆变形为主, 发育多套滑脱层(何丰胜和马文璞, 1999; 金宠等, 2009; 刘恩山等, 2010; 汪新伟等, 2010; 贵州省地质矿产局, 2013; 刘重庆等, 2013), 龙马溪组页岩气并未遭到严重破坏或重大调整。新生代以来, 伴随青藏高原的不断隆升、生长, 四川盆地不断向东推挤(张培震等, 2003; 贾承造等, 2013), 黔北原有的近南北向褶皱体系开始受到叠加改造, 部分褶皱枢纽向北东方向弯曲, 一系列北东向压扭性断裂开始发育, 局部地区发育北西向调节性断裂(王奕松等, 2021)。这些压扭性断裂为龙马溪组向上逃逸提供了通道, 导致五峰组-龙马溪组页岩内地层压力快速降低, 压力系数减小, 在向斜翼部, 部分压扭性断裂对下盘气藏调整起到封堵作用, 天然气在断裂下盘的碳酸盐岩中局部富集, 形成裂缝气藏(例如 AY1 井中石牛栏组曾发生天然气井喷), 龙马溪组页岩中仍保留的天然气差异富集形成现今的页岩气藏。综上, 笔者认为, 盆外复杂构造区内, 在物质基础充足的条件下, 在受新生代构造改造相对较弱的地区, 龙马溪组页岩气可在压扭性断裂控制下局部富集, 具有很大的勘探潜力。

(2) 复杂构造区页岩气可在更大埋深范围内富集, RX1 井良好指标暗示黔北地区具备较好的超浅层页岩气地质成藏条件和广阔的勘探前景。

在以黔北为代表的盆外复杂构造区, 五峰组-龙马溪组主要沿向斜翼部出露, 背斜构造单元中的五峰组-龙马溪组地层多已剥蚀殆尽, 预测埋深 3000m 以上地层分布局限, 仅残留于道真向斜、安场向斜等向斜核部及习水-赤水一带, 1000m 以浅的目的层广泛分布(图 10)。前人对盆内页岩气的研究认为, 深层页岩气保存条件整体好于浅层, 含气性好于浅层。2000~3500m 是目前页岩气规模商业开发的最集中的埋深, 对于埋深浅于 2000m 特别是浅于

1000m 的浅层页岩气藏，国内尚无成功开发的先例(龙胜祥等, 2018; 何勇等, 2021)。在此种认识下，盆外复杂构造区页岩气勘探前景并不明朗。

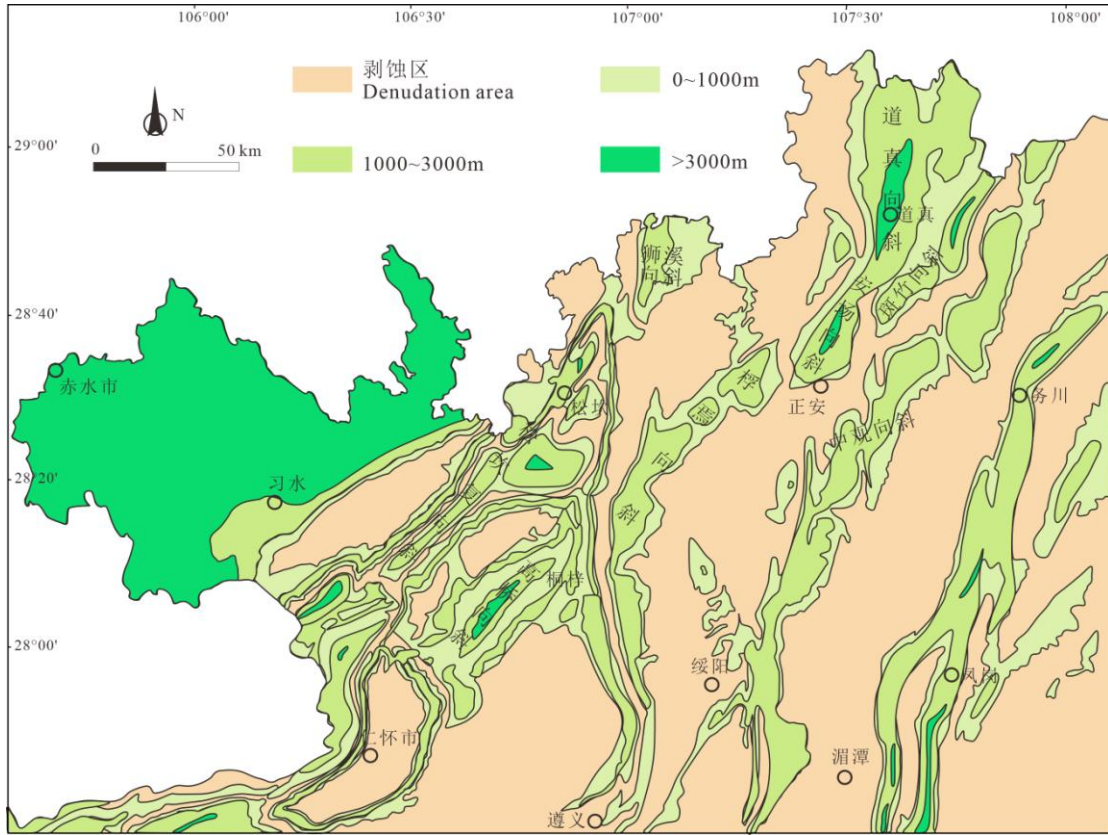


图 10 黔北地区上奥陶统五峰组底界埋深预测图

Fig. 10 Prediction of buried depth at the bottom of Wufeng Formation of Upper Ordovician in Northern Guizhou

2017 年以来，复杂构造区浅层页岩气勘探取得重大进展，昭通地区太阳背斜的 Y1 和 Y102 井通过体积压裂改造和试气求产试验，在目的层埋深小于 1000m 地区获得直井日产超 $1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 工业气流(梁兴等, 2020)。太阳背斜浅层页岩气的求产成功，证明盆缘（南缘）存在具有建产潜力的埋深 1000m 以浅的页岩气藏。利用 RX1 井获得的参数对比前人在太阳背斜建立的浅层页岩气选区评价标准(梁兴等, 2020) (表 2)，RX1 井为 II 类甜点区，具备实现超浅层页岩气工业建产潜能。RX1 井勘探实践的成功，证明盆外复杂构造区更广的范围内的向斜构造单元中，埋深 1000m 以浅页岩气可以富集成藏，具备建产潜力；超浅层页岩气的勘探经验可以在更广的范围内推广。

表2 昭通示范区浅层页岩气甜点选区评价标准(梁兴等, 2020)

Table 2 Evaluation criteria for shallow shale gas sweet spot selection in Zhaotong Demonstration Area (Liang Xing et al., 2020)

类别	TOC>2% 页岩厚度 /m	总孔 隙度 /%	总含气量 /($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)	页岩气储集 层压力系数	脆性 指数	页岩气储集层封 盖条件	构造 变形 强度	区域盖 层厚度 /m
I	>30	>4	>4	1.2~1.6	>65	泥灰岩、泥页岩	弱	>50

II	30~10	2~4	2~4	1.2~1.0	65~50	致密砂岩、灰岩	中	<50
III	<10	<2	<2	<1.0	<50	砂岩、碎裂灰岩	强	无
RX1	15	3	2	1.0	69	泥页岩	中	114

7 结论

(1) 黔北湄潭向斜五峰组-龙马溪组发育一定厚度优质页岩, 有机质丰度高、类型好、热演化程度较高、储集物性以脆性矿物含量高, 构造相对稳定, 地层倾角小, 具备较好的页岩气成藏基础地质条件。

(2) RX1 井勘探实践的成功, 证实了盆外复杂构造区目的层埋深 1000m 以浅的向斜构造单元内, 页岩气可富集成藏, 具有较好的建产潜力, 可作为下一步有利勘探目标。

(3) 受新生代构造叠加改造形成的压扭性构造系统是盆外复杂构造区页岩气富集成藏的重要场所, 压扭性构造控藏作用应是下一步勘探研究的重点。

References

- Chen Xu, Fan Junxuan, Zhang Yuandong, Wang Hongyan, Chen Qing, Wang Wenhui, Liang Feng, Guo Wei, Zhao Qun, Nie Haikuan, Wen Zhidong, Sun Zongyuan. 2015. Subdivision and delineation of the Wufeng and Lungmachi black shales in the subsurface areas of the Yangtze platform[J]. Journal of Stratigraphy, 39(4):351-358(in Chinese).
- Chen Xu, Fan Junxuan, Wang Wenhui, Wang Hongyan, Nie Haikuan, Shi Xuwen, Wen Zhidong, Chen Dongyang, Li Wenjie. 2017. Stage-progressive distribution pattern of the Lungmachi black graptolitic shales from Guizhou to Chongqing, Central China[J]. Science China Earth Sciences, 60:1133-1146 (in Chinese).
- Dembicki H. 2009. Three common source rock evaluation errors made by geologists during prospect or play appraisals[J]. AAPG Bull, 93:341-356.
- Dong Shuwen, Fang Jingshuang, Li Yong, Zhu Hongji, Schneider W, Breikreuz H, Mattern F. 1994. Middle Triassic-middle Jurassic sedimentary facies and Indosinian movement in the lower Yangtze region[J]. Geological Review, 40(2):111-119 (in Chinese with English abstract).
- Fang Zhixiong, He Xipeng. 2016. Formation and evolution of normal pressure shale gas reservoir in Wulong Syncline, Southeast Chongqing, China[J]. Oil & Gas Geology, 37(6):819-827 (in Chinese with English abstract).
- Bureau Of Geology And Mineral Resources of Guizhou Province. 2017. Regional Geology of Guizhou Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1063-

-
- 1067 (in Chinese with English abstract).
- Guo Lingzhi. 2001. South China plate tectonics[M]. Beijing: Geological Publishing House:1-7 (in Chinese).
- Guo Tonglou, Zhang Hanrong. 2014. Formation and enrichment mode of Jiaoshiba shale gas field, Sichuan Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 41(1):28-36 (in Chinese with English abstract).
- Guo Xusheng. 2014. Rules of Two-Factor Enrichment for Marine Shale Gas in Southern China ——Understanding from the Longmaxi Formation Shale Gas in Sichuan Basin and Its Surrounding Area[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(7):1209-1218 (in Chinese with English abstract).
- Guo Xusheng, Hu Dongfeng, Li Yiping, Wei Zhihong, Wei Xiangfeng, Liu Zhujiang. 2017. Geological factors controlling shale gas enrichment and high production in Fuling shale gas field[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 44(4):481-491 (in Chinese with English abstract).
- Guo Zhaojie, Zhao Haonan, Zhang Yuanyuan. 2020. Lateral foreland belt—a new type of foreland belt:a case study of Longmenshan[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 41(12):1477-1489 (in Chinese with English abstract).
- He Dengfa, Li Desheng, Zhang Guowei, Zhao Luzi, Fan Chun, Lu Renqi, Wen Zhu. 2011. Formation and evolution of multi-cycle superposed Sichuan Basin, China[J]. *Chinese Journal of Geology*, 46(3):589-606 (in Chinese with English abstract).
- He Yong, Li Lin, Liu Cheng, Wang Jianjun, Rui Yun. 2021. Economic and effective development of shale gas in mountainous areas outside the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 41(4):82-90 (in Chinese with English abstract).
- He Fengsheng, Ma Wenpu. 1999. Characteristics of shape, structure and movement of the nappe groups in qiancheng[J]. *GEOLOGY-GEOCHEMISTRY*, 27(2):33-37 (in Chinese with English abstract).
- Huang Renchun, Wei Xiangfeng, Wang Qiang. 2017. Key Factors of Shale Gas Accumulation in Dingshan Area of Southeastern Sichuan Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 22(2):25-30 (in Chinese with English abstract).
- Jarvie, D M. 1991. Total organic carbon (TOC) analysis[M]. *AAPG Treatise of Petroleum Geology, Handbook of Petroleum Geology*. 113-118.
- Jia Chengzao, Zheng Min, Zhang Yongfeng. 2012. Unconventional hydrocarbon resources in China and the prospect of exploration and development[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 39(2):129-136 (in Chinese with English abstract).

abstract).

- Jia Chengzao, Li Benliang, Lei Yongliang, Chen Zhuxin. 2013. The structure of the Circum-Tibetan Plateau Basin-Range System and the large gas provinces[J]. *Science China: Earth Sciences*, 56:1853-1863 (in Chinese with English abstract).
- Jia Chengzao. 2017. Breakthrough and significance of unconventional oil and gas to classical petroleum geological theory[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 44(1):1-11 (in Chinese with English abstract).
- Jia Dong, Chen Zhuxin, Jia Chengzao, Wei Guoqi, Li Benliang, Zhang Qie, Wei Dongtao, Shen Yang. 2003. Structural Features of the Longmen Shan Fold and Thrust Belt and Development of the Western Sichuan Foreland Basin, Central China[J]. *Geological Journal of China Universities*, 9(3):402-410 (in Chinese with English abstract).
- Jin Chong, Li Sanzhong, Wang Yuejun, Zhang Guowei, Liu Liping, Wang Jian. 2009. Diachronous and progressive deformation during the Indosinian-Yanshanian movements of the Xuefeng Mountain intracontinental composite tectonic system[J]. *Oil & Gas Geology*, 30(5):598-607 (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(12):848-861.
- Loucks R G , Reed R M , Ruppel S C , Hammes, U. 2012. Spectrum of pore types and networks in mudrocks and a descriptive classification for matrix-related mudrock pores[J]. *AAPG Bulletin*, 96(6):1071-1098.
- Löhr S C, Baruch E T, Hall P A, Kennedy M J. 2015. Is organic pore development in gas shales influenced by the primary porosity and structure of thermally immature organic matter?[J]. *Organic Geochemistry: A Publication of the International Association of Geochemistry and Cosmochemistry*, 87:119-132.
- Li Benliang, Lei Yongliang, Chen Zhuxin, Jia Dong, Zhan Chaojun. 2011. The neotectonic deformation features in the eastern segment of Circum-Tibetan Plateau Basin and Range System : Take the western Sichuan basin as an example[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27 (3):636-644 (in Chinese with English abstract).
- Li Changwei, Tao Shizhen, Dong Dazhong, Guan Quanzhong. 2015. Comparison of the Formation Condition of Shale Gas between Domestic and Abroad and Favorable Areas Evaluation[J]. *Natural Gas Geoscience*, 26(5):986-1000 (in Chinese with English abstract).

-
- Liang Xing, Xu Zhengyu, Zhang Zhao, Wang Weixu, Zhang Jiehui, Lu Huili, Zhang Lei, Zou Chen, Wang Gaocheng, Mei Yu, Rui Yun. 2020. Breakthrough of shallow shale gas exploration in Taiyang anticline area and its significance for resource development in Zhaotong, Yunnan province, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 47(1):11-28 (in Chinese with English abstract).
- Liang Xing, Zhang Tingshan, Shu Honglin, Min Huajun, Zhang Zhao, Zhang Lei. 2020. Evaluation of shale gas resource potential of Longmaxi Formation in Zhaotong National Shale Gas Demonstration Area in the Northern Yunnan-Guizhou[J]. *Geology in China*, 47(1):72-87(in Chinese with English abstract).
- Liu Hefu, Liang Huishe, Cai Liguang, Shen Fei. 1994. Structural styles of the Longmenshan thrust belt and evolution of foreland basin in western Sichuan province, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 68(2):101-118 (in Chinese with English abstract).
- Liu Shugen, Tong Chongguang, Luo Zhili, Dai Sulan, Pang Jiali, Zhang Guozheng, He Jun. 1995. The formation and evolution of late Triassic foreland basin in west Sichuan[J]. *Natural Gas Industry*, 15(2):11-15 (in Chinese).
- Liu Shugen, Luo Zhili, Zhao Xikui, Xu Guosheng, Wang Guozhi, Zhang Chengjiang. 2003. Coupling Relationships of Sedimentary Basin-Orogenic Belt Systems and Their Dynamic Models in West China--A Case Study of the Longmenshan Orogenic Belt-West Sichuan Foreland Basin System[J]. *Acta Geologica Sinica*, 77(2):177-186 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chongqing; Zhou Jianxun; Lang Jian. 2013. Study on Restrictive Factor of Fold-thrust Belt Formation with Multiple Decollements: Taking Eastern Sichuan-Xuefeng Tectonic Belt as an Example[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 35(2):45-55 (in Chinese with English abstract).
- Liu Enshan, Li Sanzhong, Jin Chong, Dai Liming, Liu Bo, Zhang Guowei. 2010. Yanshanian structural deformation and dynamics of the Xuefengshan intracontinental tectonic system[J]. *MARINE GEOLOGY & QUATERNARY GEOLOGY*, 30(5):63-74 (in Chinese with English abstract).
- Long Shengxiang, Feng Dongjun, Li Fengxia, Du Wei. 2018. Prospect of the deep marine shale gas exploration and development in the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 29(4):443-451 (in Chinese with English abstract).
- Lin Ruiqin, Shi Fulun, Wang Yisong, Zhang Daquan, Feng Xia, Jiang Zhenxue, Liu Dadong, Yang Wei, Zhang Ziya, Zhao Fuping, Sun Zhao, Chen Yi, Lu Shufan, Du Wei. 2020. Shale Gas Accumulation Conditions and Exploration Prospects of

-
- Wufeng-Longmaxi Formation in Shixi Area, North Guizhou[J/OL]. *Geology in China* (in Chinese with English abstract).
- Ma Yongsheng, Cai Xunyu, Zhao Peirong. 2018. China's gas exploration and development : Understanding and practice[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 45(4):561-574 (in Chinese with English abstract).
- Nie Haikuan, Zhang Jinchuan. 2012. Study on the Shale Gas Accumulation Conditions and Gas Content Calculation-Taking the Lower Paleozoic in Sichuan Basin and its periphery as an Example[J]. *Acta Geologica Sinica*, 86(2):349-361 (in Chinese with English abstract).
- Nie Haikuan, Jin Zhijun, Bian Ruikang, Du Wei. 2016. The “source-cap hydrocarbon-controlling” enrichment of shale gas in Upper Ordovician Wufeng Formation-Lower Silurian Longmaxi Formation of Sichuan Basin and its periphery[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 37(5):557-571 (in Chinese with English abstract).
- Peters, K E. 1986. Guidelines for evaluating petroleum source rock using programmed pyrolysis[J]. *AAPG Bull*, 70(4):318-329.
- Ren Jishun, Chen Tingyu, Niu Baogui. 1990. Tectonic evolution and mineralization of continental lithosphere in eastern China and adjacent areas[M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Ronov A B. 1958. Organic carbon in sedimentary rocks (in relation to the presence of petroleum)[J].*Geochemistry*, 5:497-509.
- Rong Jiayu, Chen Xu, Wang Yi, Zhan Renbin, Liu Jianbo, Huang Bing, Tang Peng, Wu Rongchang, Wang Guangxu. 2011. Northward expansion of Central Guizhou Oldland through the Ordovician and Silurian transition: Evidence and implications . *Sci Sin Terrae*, 41(10):1407-1415 (in Chinese).
- Shu Liangshu. 2012. An analysis of principal features of tectonic evolution in South China Block[J]. *Geological Bulletin of China*, 31(7):1035-1053 (in Chinese with English abstract).
- Tian Gong. 2018. Petrochina has made a major breakthrough in deep shale gas exploration in Chongqing[J]. *Natural Gas Industry*, 38(6):82 (in Chinese).
- Wang Erchie, Su Zhe, Xu Guang. 2009. A case study on lateral extrusion occurred along some orogenic belts in China[J]. *Chinese Journal of Geology*, 44(4):1266-1288 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaolei. 2020. Progress and suggestions of exploration and development for deep shale gas of Wufeng-Longmaxi Formation in Sichuan Basin [J]. *Science Technology and Engineering*, 20(14):5457-5467 (in Chinese with English abstract).

abstract).

- Wang Yang, Wang Yuejun, Zhang Peizhen, Zhang Jinjiang, Zhang Bo, Liu Jing, Zhou Renjie, Wang Weitao, Zhang Huiping, Li Changjun. 2022. Cenozoic tectonic evolution of regional fault systems in the SE Tibetan Plateau[J]. *Science China Earth Sciences*, 65(4):601-623.
- Wang Yisong, Hu Hanwen, Shi Fulun, Lin Ruiqin, Liu Dadong, Feng Xia, Zhang Daquan, Zhou Zhe, Zhao Fuping, Sun Zhao. 2021. Reservoir-forming process of shale gas in Wufeng-Longmaxi Formations in northern Guizhou Province and its exploration implications: Evidence from fluid inclusions[J]. *Natural Gas Geoscience*, 32 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xinwei, Wo Yujin, Zhou Yan, Zhang Rongjiang, Li Shuangjian. 2010. The kinematics of the fold-thrust zones in the western Yangtze Area [J]. *Earth Science Frontiers*, 17(3):200-212 (in Chinese with English abstract).
- Wei Guoqi, Jia Dong, Yang Wei, Xiao Ancheng, Wang Liangshu, Wu Lei. 2019. Structural characteristics and petroleum in Sichuan Basin[M]. Beijing: Science Press, 1-4 (in Chinese).
- Xu Jinghua, Sun Shu, Li Jiliang. 1987. It is the South China orogenic belt rather than the South China platform[J]. *Science in China: Series B*, (10):87-95 (in Chinese).
- Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Li Haibing, Ji Shaocheng, Zhang Zeming, Liu Yan. 2011. On the Tectonics of the India-Asia Collision[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(1):1-33 (in Chinese with English abstract).
- Xie Guoai, Jia Dong, Zhang Qinglong, Wu Xiaojun, Shen Li, Lv Yunshan, Zou Xu. 2013. Physical Modeling of the Jura-Type Folds in Eastern Sichuan[J]. *Acta Geologica Sinica*, 87(6):773-788 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Gangyi, Bao Shujing, Pang Fei, Ren Shoumai, Chen Ke, Wang Yufang, Zhou Zhi, Wang Shengjian. 2017. Reservoir-forming pattern of “four-storey ” hydrocarbon accumulation in Anchang syncline of northern Guizhou Province[J]. *Geology in China*, 44(1):1-12 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Gangyi, Wang Yufang, Zhou Zhi, Yu Shufang, Chen Xianglin, Zhang Yunxiao. 2018a. Exploration and research progress of shale gas in China[J]. *China Geology*, 1:257-272.
- Zhai Gangyi, Wang Yufang, Zhou Zhi, Liu Guoheng, Yang Yuru, Li Juan. 2018b. “Source-Diagenesis-Accumulation” enrichment and accumulation regularity of marine shale gas in southern China[J]. *China Geology*, 1:319-330.
- Zhang Guowei, Guo Anlin, Wang Yuejun, Li Sanzhong, Dong Yunpeng, Liu Shaofeng,

-
- He Dengfa, Chen Shunyou, Lu Rukui, Yao Anping. 2013. Tectonics of South China continent and its implications[J]. Science China: Earth Sciences, (10):1553-1582 (in Chinese).
- Zhang Jinchuan, Jiang Shengling, TANG Xuan, Zhang Peixian, TANG Ying, Jin Tiewa. 2009. Accumulation types and resources characteristics of shale gas in China[J]. Natural Gas Industry, 29(12):109-114(in Chinese).
- Zhang Jinchuan, Lei Huaiyu, Zhang Fu, Li Long, Liu Ziyi, Liu Yang, Zhang Peng. 2018. Origin of on natural gas in the Lower Silurian Songkan Formation from Well Anye 1, north Guizhou area[J]. Oil & Gas Geology, 39(3):419-428 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Peizhen, Deng Qidong, Zhang Guomin, Ma Jin, Gan Weijun, Min Wei, Mao Fengying, Wang Qi. 2003. Strong earthquake activity and active block in mainland China[J]. Science in China : Series D, 33(z1):12-20 (in Chinese).
- Zhang Peizhen, Shen Zhengkang, Wang Min, Gan Weijun. 2004. Kinematics of present-day tectonic deformation of the tibetan plateau and its vicinities [J]. SEISMOLOGY AND GEOLOGY, 26(3):367-377 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Peizhen, Xu Xiwei, Wen Xueze, Ran Yongkang. 2008. Slip rates and recurrence intervals of the Longmen Shan active fault zone, and tectonic implications for the mechanism of the May 12 Wenchuan earthquake, 2008, Sichuan, China[J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 51(4):1066-1073 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, Li Jianhua, Shi Wei. 2011. Mesozoic multi-directional compressional tectonics and formation-reformation of Sichuan basin[J]. Geology in China, 38(2):233-250 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, Li Jianhua, Cui Jianjun, Shi Wei, Su Jinbao, Li Yong. 2012. The New Progress in the Study of Mesozoic Tectonics of South China[J]. ACTA GEOSCIENCE SINICA, 33(3):257-279 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Wenzhi, Jia Ailin, Wei Yunsheng, Wang Junlei, Zhu Hanqin. 2020. Progress in shale gas exploration in China and Prospects for future development[J]. China Petroleum Exploration, 25(1):31-44 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Wenjun, Zhang Peizhen, Yuan Daoyang, Wuchuanrong, Li Zhigang, Ge Weipeng, Wang Weitao, Wang Yang. 2019. Basic characteristics of active tectonics and associated geodynamic processes in continental china[J]. Journal of

Geomechanics, 25(5):699-721 (in Chinese with English abstract).

Zou Caineng, Zhang Guangya, Tao Shizhen, Hou Lianhua, Qu Hui, Zhao Xia, Jia Jinhua, Gao Xiaohui, Guo Qiulin, Wang Lan, Li Xinjing. 2010. Geological features, major discoveries and unconventional petroleum geology in the global petroleum exploration[J]. Petroleum Exploration and Development, 37(2):129-145 (in Chinese with English abstract).

Zou Caineng, Zhu Rukai, Wu Songtao, Yang Zhi, Tao Shizhen, Yuan Xuanjun, Hou Lianhua, Li Denghua, Bai Bin, Wang Lan. 2012. Types, characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations:taking tight oil and tight gas in China as an instance[J]. Editorial office of ACTA PETROLEI SINICA, 33(2):173-187 (in Chinese with English abstract).

Zou Caineng; Zhang Guosheng; Yang Zhi; Tao Shizhen, Hou Lianhua, Zhu Rukai, Yuan Xuanjun, Ran Qiquan, Li Denghua, Wang Zhiping. 2013. Geological concepts, characteristics, resource potential and key techniques of unconventional hydrocarbon: On unconventional petroleum geology[J]. Petroleum Exploration and Development, 40(4):385-399 (in Chinese with English abstract).

Zou Caineng, Pan Songqi, Jing Zhenhua, Gao Jinliang, Yang Zhi, Wu Songtao, Zhao Qun. 2020. Shale oil and gas revolution and its impact[J]. Acta Petrolei Sinica, 41(1):1-12 (in Chinese with English abstract).

Zou Caineng, Yang Zhi, Dong Dazhong, Zhao Qun, Chen Zhenhong, Feng Youliang, Li Jiarui, Wang Xiaoni. 2020. Formation, Distribution and Prospect of Unconventional Hydrocarbons in Source Rock Strata in China[J]. Earth Science, 47(5):1517-1533 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈旭, 樊隽轩, 张元动, 王红岩, 陈清, 王文卉, 梁峰, 郭伟, 赵群, 聂海宽, 文治东, 孙宗元. 2015. 五峰组及龙马溪组黑色页岩在扬子覆盖区内的划分与圈定[J]. 地层学杂志, 39(4):351-358.
- 陈旭, 樊隽轩, 王文卉, 王红岩, 聂海宽, 石学文, 文治东, 陈冬阳, 李文杰. 2017. 黔渝地区志留系龙马溪组黑色笔石页岩的阶段性渐进展布模式[J]. 中国科学: 地球科学, 47:720-732.
- 董树文, 方景爽, 李勇, 朱洪吉, Schneider W, Breikreuz H, Mattern F. 1994. 下扬子中三叠世—中侏罗世沉积相与印支运动[J]. 地质论评, 40(2):111-119.
- 方志雄, 何希鹏. 2016. 渝东南武隆向斜常压页岩气形成与演化[J]. 石油与天然气地质, 37(6):819-827.
- 贵州省地质矿产局. 2017. 贵州省区域地质志(中国区域地质志, 贵州志)[R]:贵州省地质调查院, 1063-1067.
- 郭令智. 2001. 华南板块构造[M]. 北京: 地质出版社, 1-7.
- 郭彤楼, 张汉荣. 2014. 四川盆地焦石坝页岩气田形成与富集高产模式[J]. 石油勘探与开发, 41(1):28-36.
- 郭旭升. 2014. 南方海相页岩气“二元富集”规律——四川盆地及周缘龙马溪组页岩气勘探实践认识[J]. 地质学报, 88(7):1209-1218.
- 郭旭升, 胡东风, 李宇平, 魏志红, 魏祥峰, 刘珠江. 2017. 涪陵页岩气田富集高产主控地质因素[J]. 石油勘探与开发, 44(4):481-491.
- 郭召杰, 赵浩男, 张元元. 2020. 侧缘前陆构造带:一种前陆构造带的新类型——以龙门山为例[J]. 石油学报, 41(12):1477-1489.
- 何登发, 李德生, 张国伟, 赵路子, 樊春, 鲁人齐, 文竹. 2011. 四川多旋回叠合盆地的形成与演化[J]. 地质科学, 46(3):589-606.
- 何勇, 李林, 刘成, 王建君, 芮昀. 2021. 盆外山地浅层页岩气经济有效开发对策探索[J]. 天然气工业, 41(04):82-90.
- 何丰胜, 马文璞. 1999. 黔城推覆体群的形态、结构和运动学特征[J]. 地质地球化学, 27(2):33-37.
- 黄仁春, 魏祥峰, 王强. 2017. 四川盆地东南缘丁山地区页岩气成藏富集的关键控制因素[J]. 海相油气地质, 22(2):25-30.
- 贾承造, 郑民, 张永峰. 2012. 中国非常规油气资源与勘探开发前景[J]. 石油勘探与开发, 39(2):129-136.
- 贾承造, 李本亮, 雷永良, 陈竹新. 2013. 环青藏高原盆山体系构造与中国中西部天然气大气区[J]. 中国科学: 地球科学, 43(10):1621-1631.
- 贾承造. 2017. 论非常规油气对经典石油天然气地质学理论的突破及意义[J]. 石油

-
- 勘探与开发, 44(1):1-11.
- 贾东, 陈竹新, 贾承造, 魏国齐, 李本亮, 张愜, 魏东涛, 沈扬. 2003. 龙门山前陆褶皱冲断带构造解析与川西前陆盆地的发育[J]. 高校地质学报, 9(3):402-410.
- 金宠, 李三忠, 王岳军, 张国伟, 刘丽萍, 王建. 2009. 雪峰山陆内复合构造系统印支—燕山期构造穿时递进特征[J]. 石油与天然气地质, 30(5):598-607.
- 李本亮, 雷永良, 陈竹新, 贾东, 张朝军. 2011. 环青藏高原盆山体系东段新构造变形特征——以川西为例[J]. 岩石学报, 27(3):636-644.
- 李昌伟, 陶士振, 董大忠, 管全中. 2015. 国内外页岩气形成条件对比与有利区优选[J]. 天然气地球科学, 26(5):986-1000.
- 梁兴, 徐政语, 张朝, 王维旭, 张介辉, 鲁慧丽, 张磊, 邹辰, 王高成, 梅珏, 芮昀. 2020. 昭通太阳背斜区浅层页岩气勘探突破及其资源开发意义[J]. 石油勘探与开发, 47(1):11-28.
- 梁兴, 张廷山, 舒红林, 闵华军, 张朝, 张磊. 2020. 滇黔北昭通示范区龙马溪组页岩气资源潜力评价[J]. 中国地质, 47(1): 72-87.
- 刘和甫, 梁慧社, 蔡立国, 沈飞. 1994. 川西龙门山冲断系构造样式与前陆盆地演化[J]. 地质学报, 68(2):101-118.
- 刘树根, 童崇光, 罗志立, 戴苏兰, 庞家黎, 张国政, 何军. 1995. 川西晚三叠世前陆盆地的形成与演化[J]. 天然气工业, 15(2):11-15.
- 刘树根, 罗志立, 赵锡奎, 徐国盛, 王国芝, 张成江. 2003. 中国西部盆山系统的耦合关系及其动力学模式——以龙门山造山带—川西前陆盆地系统为例[J]. 地质学报, 77(2):177-186.
- 刘恩山, 李三忠, 金宠, 戴黎明, 刘博, 张国伟. 2010. 雪峰陆内构造系统燕山期构造变形特征和动力学[J]. 海洋地质与第四纪地质, 30(5):63-74.
- 刘重庆, 周建勋, 郎建. 2013. 多层滑脱条件下褶皱-冲断带形成制约因素研究:以川东—雪峰构造带为例[J]. 地球科学与环境学报, 35(2):45-55.
- 龙胜祥, 冯动军, 李凤霞, 杜伟. 2018. 四川盆地南部深层海相页岩气勘探开发前景[J]. 天然气地球科学, 29(4):443-451.
- 林瑞钦, 石富伦, 王奕松, 张大权, 冯霞, 姜振学, 刘达东, 杨威, 张子亚, 赵福平, 孙钊, 陈祎, 卢树藩, 杜威. 2022. 黔北狮溪地区五峰组—龙马溪组页岩气成藏条件及其勘探前景[J/OL]. 中国地质.
- 马永生, 蔡勋育, 赵培荣. 2018. 中国页岩气勘探开发理论认识与实践[J]. 石油勘探与开发, 45(4):561-574.
- 聂海宽, 张金川. 2012. 页岩气聚集条件及含气量计算——以四川盆地及其周缘下古生界为例[J]. 地质学报, 86(2):349-361.
- 聂海宽, 金之钧, 边瑞康, 杜伟. 2016. 四川盆地及其周缘上奥陶统五峰组—下志留

-
- 统龙马溪组页岩气"源-盖控藏"富集[J]. 石油学报, 37(5):557-571.
- 任纪舜, 陈廷愚, 牛宝贵. 1990. 中国东部及邻区大陆岩石圈的构造演化与成矿[M]. 北京: 科学出版社.
- 戎嘉余, 陈旭, 王恽, 詹仁斌, 刘建波, 黄冰, 唐鹏, 吴荣昌, 王光旭. 2011. 奥陶-志留纪之交黔中古陆的变迁: 证据与启示[J]. 中国科学: 地球科学, 41(10):1407-1415.
- 舒良树. 2012. 华南构造演化的基本特征[J]. 地质通报, 31(7):1035-1053.
- 天工. 2018. 中石油在重庆地区深层页岩气勘探喜获重大突破[J]. 天然气工业, 38(6):82.
- 王二七, 苏哲, 许光. 2009. 我国的一些造山带的侧向挤出构造[J]. 地质科学, 44(4):1266-1288.
- 王晓蕾. 2020. 四川盆地五峰-龙马溪组深层页岩气勘探开发进展及建议[J]. 科学与技术工程, 20(14):5457-5467.
- 王洋, 王岳军, 张培震, 张进江, 张波, 刘静, 周人杰, 王伟涛, 张会平, 李长军. 2022. 青藏高原东南缘断裂体系新生代构造演化[J]. 中国科学: 地球科学, 52(5):777-802.
- 王奕松, 胡瀚文, 石富伦, 林瑞钦, 刘达冬, 冯霞, 张大权, 周喆, 赵福平, 孙钊. 2021. 黔北地区五峰组—龙马溪组页岩气成藏过程及勘探启示: 来自流体包裹体的证据[J]. 天然气地球科学, (32).
- 汪新伟, 沃玉进, 周雁, 张荣强, 李双建. 2010. 上扬子地区褶皱-冲断带的运动学特征[J]. 地学前缘, 17(3):200-212.
- 魏国齐, 贾东, 杨威, 肖安成, 王良书, 吴磊. 2019. 四川盆地构造特征与油气[M]. 北京: 科学出版社, 1-4.
- 许靖华, 孙枢, 李继亮. 1987. 是华南造山带而不是华南地台[J]. 中国科学: B 辑, 17(10):1107-1115.
- 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 嵇少丞, 张泽明, 刘焰. 2011. 印度-亚洲碰撞大地构造[J]. 地质学报, 85(1):1-33.
- 解国爱, 贾东, 张庆龙, 吴晓俊, 沈礼, 吕赞珊, 邹旭. 2013. 川东侏罗山式褶皱构造带的物理模拟研究[J]. 地质学报, 87(6):773-788.
- 翟刚毅, 包书景, 庞飞, 任收麦, 陈科, 王玉芳, 周志, 王胜建. 2017. 贵州遵义地区安场向斜"四层楼"页岩油气成藏模式研究[J]. 中国地质, 44(1):1-12.
- 张国伟, 郭安林, 王岳军, 李三忠, 董云鹏, 刘少峰, 何登发, 程顺有, 鲁如魁, 姚安平. 2013. 中国华南大陆构造与问题[J]. 中国科学: 地球科学, (10):1553-1582.
- 张金川, 姜生玲, 唐玄, 张培先, 唐颖, 荆铁亚. 2009. 我国页岩气富集类型及资源特点[J]. 天然气工业, 29(12):109-114.

-
- 张金川, 雷怀玉, 张福, 李龙, 刘子驿, 刘飏, 张鹏. 2018. 黔北地区安页 1 井下志留统松坎组天然气成因[J]. 石油与天然气地质, 39(3):419-428.
- 张培震, 邓起东, 张国民, 马瑾, 甘卫军, 闵伟, 毛凤英, 王琪. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. 中国科学:D 辑, 33(z1):12-20.
- 张培震, 沈正康, 王敏, 甘卫军. 2004. 青藏高原及周边现今构造变形的运动学[J]. 地震地质, 26(3):367-377.
- 张培震, 徐锡伟, 闻学泽, 冉勇康. 2008. 2008 年汶川 8.0 级地震发震断裂的滑动速率、复发周期和构造成因[J]. 地球物理学报, 51(4):1066-1073.
- 张岳桥, 董树文, 李建华, 施炜. 2011. 中生代多向挤压构造作用与四川盆地的形成和改造[J]. 中国地质, 38(2):233-250.
- 张岳桥, 董树文, 李建华, 崔建军, 施炜, 苏金宝, 李勇. 2012. 华南中生代大地构造研究新进展[J]. 地球学报, 33(3):257-279.
- 赵文智, 贾爱林, 位云生, 王军磊, 朱汉卿. 2020. 中国页岩气勘探开发进展及发展展望[J]. 中国石油勘探, 25(1):31-34.
- 郑文俊, 张培震, 袁道阳, 吴传勇, 李志刚, 葛伟鹏, 王伟涛, 王洋. 2019. 中国大陆活动构造基本特征及其对区域动力过程的控制[J]. 地质力学学报, 25(5):699-721.
- 邹才能, 张光亚, 陶士振, 侯连华, 瞿辉, 赵霞, 贾进华, 高晓辉, 郭秋麟, 王岚, 李新景. 2010. 全球油气勘探领域地质特征、重大发现及非常规石油地质[J]. 石油勘探与开发, 037(002):129-145.
- 邹才能, 朱如凯, 吴松涛, 杨智, 陶士振, 袁选俊, 侯连华, 李登华, 白斌, 王岚. 2012. 常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望——以中国致密油和致密气为例[J]. 石油学报, 33(2):173-187.
- 邹才能, 张国生, 杨智, 陶士振, 侯连华, 朱如凯, 袁选俊, 冉启全, 李登华, 王志平. 2013. 非常规油气概念、特征、潜力及技术——兼论非常规油气地质学[J]. 石油勘探与开发, 40(4):385-399.
- 邹才能, 潘松圻, 荆振华, 高金亮, 杨智, 吴松涛, 赵群. 2020. 页岩油气革命及影响[J]. 石油学报, 41(1):1-12.
- 邹才能, 杨智, 董大忠, 赵群, 陈振宏, 冯有良, 李嘉蕊, 王小妮. 2022. 非常规源岩层系油气形成分布与前景展望[J]. 地球科学, 47(5):1517-1533.