

doi: 10.12029/gc20200928002

张婕, 魏红霞, 汪双清, 沈斌, 庞飞, 李梦来, 杨柳. 2025. 武陵山地区下志留统石牛栏组狭缝型碳酸盐岩气成因分析[J]. 中国地质, 52(2): 691–703.

Zhang Jie, Wei Hongxia, Wang Shuangqing, Shen Bin, Pang Fei, Li Menglai, Yang Liu. 2025. Genesis analysis of slit-type carbonate gas reservoir in the Lower Silurian Shiniulan Formation in Wulingshan area[J]. Geology in China, 52(2): 691–703(in Chinese with English abstract).

# 武陵山地区下志留统石牛栏组狭缝型碳酸盐岩气成因分析

张婕<sup>1</sup>, 魏红霞<sup>1</sup>, 汪双清<sup>1</sup>, 沈斌<sup>1</sup>, 庞飞<sup>2</sup>, 李梦来<sup>3</sup>, 杨柳<sup>3</sup>

(1. 国家地质实验测试中心, 北京 100037; 2. 中国地质调查局, 北京 100037; 3. 重庆地质矿产研究院, 重庆 400042)

**摘要:**【研究目的】中国黔北地区广泛分布有寒武系—奥陶系、志留系、石炭系—二叠系等多套海相烃源岩, 在纵向上具备良好的生—储—盖组合, 天然气资源潜力大, 勘探开发前景广阔。为了更好地评价该区天然气资源, 基于黔北武陵山地区安场向斜安页 1 井“四层楼式”复合天然气藏发现进行研究。【研究方法】本文通过野外地质调查和室内研究相结合、地质追索与地球化学分析相结合、宏观观察与微观手段相结合的方法, 并结合文献调研, 分析了安场向斜石牛栏组天然气藏的成因。【研究结果】石牛栏组为狭缝型碳酸盐岩气藏, 下伏龙马溪组为其主要气源, 区内多期构造运动为其成藏提供了动力。【结论】本研究对于完善区内天然气资源评价具有积极意义, 也有助于丰富和发展复杂构造带油气成藏理论。

**关键词:** 安页 1 井; 石牛栏组; 致密气; 储集条件; 地质调查工程

**创新点:** 通过多手段联合研究, 明确了石牛栏组天然气为狭缝型碳酸盐岩气, 主要来源于下伏龙马溪组烃源岩, 建立了新的源储配置关系。

中图分类号: P618.13 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2025)02-0691-13

## Genesis analysis of slit-type carbonate gas reservoir in the Lower Silurian Shiniulan Formation in Wulingshan area

ZHANG Jie<sup>1</sup>, WEI Hongxia<sup>1</sup>, WANG Shuangqing<sup>1</sup>, SHEN Bin<sup>1</sup>, PANG Fei<sup>2</sup>, LI Menglai<sup>3</sup>, YANG Liu<sup>3</sup>

(1. National Research Center for Geoanalysis, Beijing 100037, China; 2. China Geological Survey, Beijing 100037, China; 3. Chongqing Institute of Geology & Mineral Resources, Chongqing 400042, China)

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

**[Objective]** Multiple sets of marine source rocks such as Cambrian–Ordovician, Silurian, Carboniferous–Permian, etc. are widely distributed in the northern Guizhou area of China, which have a good source–reservoir–caprock combination vertically and are of great natural gas resource potential and prospects for exploration and development. In order to better assess the natural gas resources in the area, on the basis of the discovery of the "four-story" composite natural gas reservoir in Anye 1 Well of the Anchang syncline

收稿日期: 2020-09-28; 改回日期: 2021-03-17

基金项目: 国家科技重大专项(2016ZX05034-003)和中国地质调查局项目(DD20190086)联合资助。

作者简介: 张婕, 女, 1995 年生, 硕士, 主要从事油气地球化学方向研究; E-mail: 916765986@qq.com。

通信作者: 汪双清, 男, 1961 年生, 研究员, 主要从事油气地球化学方向研究; E-mail: herr007@163.com。

in the Wulingshan area, northern Guizhou, this paper discusses the genesis of the Shiniulan Formation gas reservoir in the Anchang syncline. **[Methods]** Field geological works and indoor studies, geological probes and geochemical analyses, macroscopic observations and microscopic techniques, as well as literature researches were carried out. **[Results]** It is considered to be a slit-type carbonate gas reservoir, the gas is mainly derived from the underlying Longmaxi Formation, and the multiple stage tectonic movements in the area provided the driving force for its accumulation. **[Conclusions]** This research is significant for natural gas resources assessment of the region, and is also helpful for enriching and developing the theory of hydrocarbon accumulation in complex structural belts.

**Key words:** Anye 1 Well; Shiniulan Formation; tight gas; storage condition; geological survey engineering

**Highlights:** Through a multi-method integrated study, it has been clarified that the natural gas in the Shiniulan Formation is fractured carbonate gas primarily derived from the underlying Longmaxi Formation source rock, establishing a new source-reservoir configuration relationship.

**About the first author:** ZHANG Jie, female, born in 1995, master, engaged in oil and gas geochemistry; E-mail: 916765986@qq.com.

**About the corresponding author:** WANG Shuangqing, male, born in 1961, professor, engaged in oil and gas geochemistry; E-mail: herr007@163.com.

**Fund support:** Supported by National Science and Technology Major Project (No.2016ZX05034-003) and China Geological Survey Project (No.DD20190086).

## 1 引 言

寒武系—奥陶系、志留系、石炭系—二叠系的多套海相烃源岩在中国南方四川、贵州、云南、湖北、湖南、江西、浙江等省广泛分布,有良好的生—储—盖组合,常规和非常规天然气的潜力巨大(王勤等, 2017; 葛明娜等, 2020; 洪海涛等, 2020; 林瑞钦等, 2024)。翟刚毅等(2017)在黔北武陵山地区安场向斜安页 1 井发现了“四层楼式”复合天然气藏,深入研究该气藏的储层特征及其天然气富集条件与模式,对于更好地认识该区油气成藏机制,扩大勘探成果,丰富天然气成藏理论具有积极意义。

关于致密碳酸盐岩的研究较少,有四川盆地下侏罗统大安寨段致密碳酸盐岩和塔里木盆地古生界碳酸盐岩的孔隙发育影响因素及其压裂物性方面的研究(周大志等, 2009; 孙文峰等, 2017; 葛明娜等, 2019),但在碳酸盐岩致密气的来源,储层孔隙结构特征定量表征,以及其对于天然气成藏的影响方面的综合研究尚未见报道。

川东南地区石牛栏组的致密碳酸盐岩,前人研究表明,其成岩演化过程相对比较简单,原生孔隙发育差,甚至几乎不发育,储层物性也很一般,主要储层类型为Ⅲ类储层和Ⅳ类储层(汪建辉, 2008)。然而,安页 1 井石牛栏组获得了工业性气流(翟刚毅

等, 2017),证明石牛栏组具有良好的天然气成藏储集条件。为此,本文通过野外地质考查与室内研究相结合、地质追索与地球化学分析相结合、宏观观察与微观手段相结合的方法针对该区下志留统石牛栏组碳酸盐岩气的成因进行了研究。

## 2 区域地质背景

安场向斜位于贵州省遵义市正安县安场镇,地质构造上属于武陵山侏罗山式褶皱带的西南段,处于道真向斜的南侧,东西两侧分别是隔槽式褶皱和隔挡式褶皱。安场向斜延伸长度约 30 km,轴向北北东 20°~30°,位于槽挡转换带的西南端;东翼岩层倾角约为 50°,相对较陡;西翼地层倾角一般在 25°~35°,相对较缓,平面上被一条北东向的逆断层所切割;核部由侏罗系—三叠系组成;翼部有二叠系、志留系和奥陶系(图 1)。

安页 1 井位于安场向斜西翼,是一口页岩气参数井,井深 2900.17 m,钻遇地层包括二叠系栖霞组、下志留统石牛栏组、下志留统龙马溪组和上奥陶统五峰组、奥陶系宝塔组,完钻层位为寒武系委山关组。

遵义市土地垭口石牛栏组剖面(28°34′101″N、107°26′677″E)位于安场向斜南东翼,全长 529 m。综合野外观察、显微镜下鉴定、总有机碳测定及

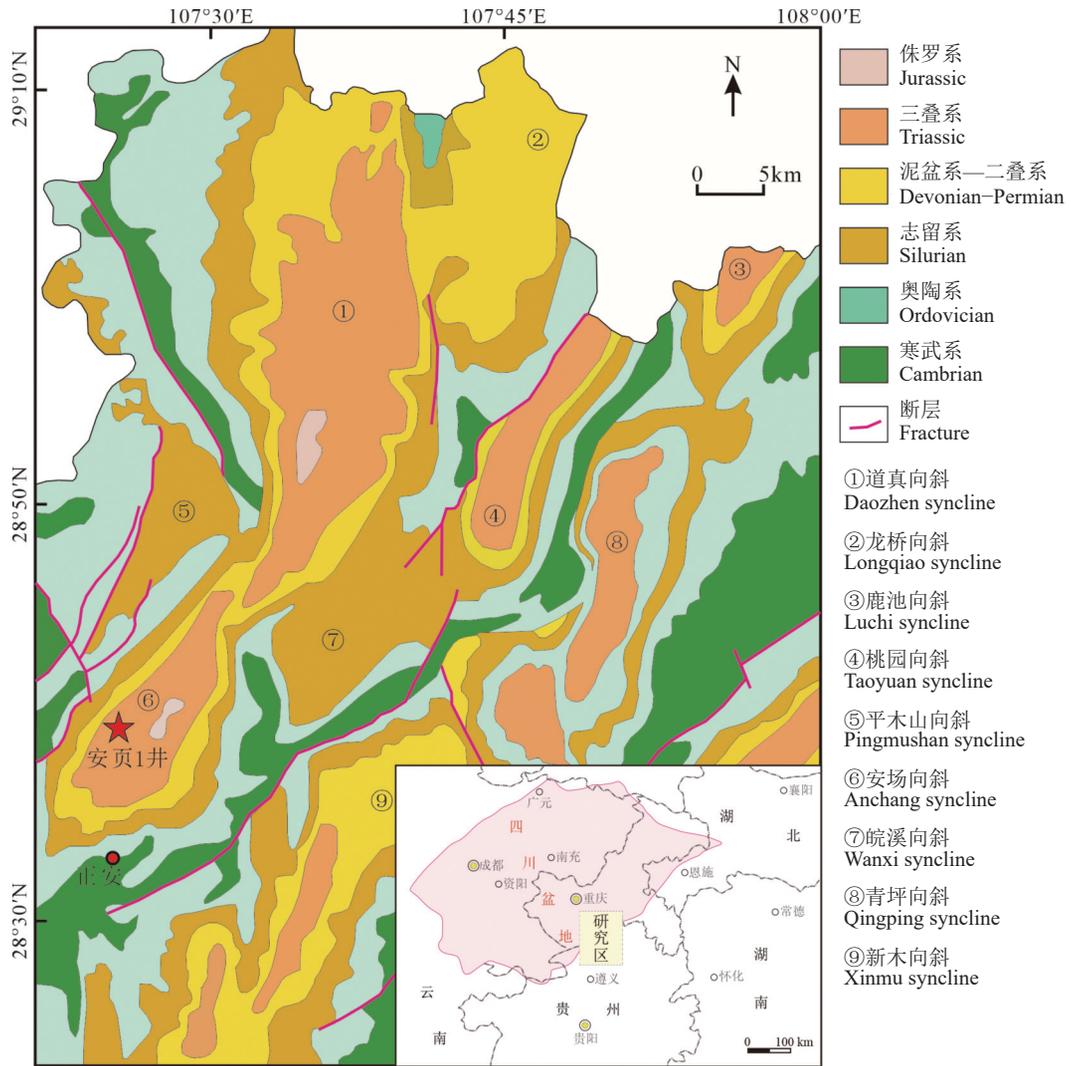


图 1 安场向斜地质简图(据 Gu et al., 2013 修改)  
Fig.1 Geological map of the Anchang syncline (modified from Gu et al., 2013)

XRD 分析的实验结果, 石牛栏组主要为浅灰、深灰色中—厚层状灰岩、生屑瘤状灰岩间夹钙质泥岩与粉砂岩, 见有珊瑚、层孔虫、腕足类等化石, 可划分为 32 个小层(图 2)。

### 3 实验部分

#### 3.1 实验样品

实验样品见表 1, 包括石牛栏组岩心样品 5 件, 石牛栏组露头样品 32 件, 韩家店组露头样品 1 件, 龙马溪组露头样品 15 件。样品分别采自安场向斜的安页 1 井及其西翼和东翼的由道路建设工程施工开挖出的两个新鲜露头剖面, 即遵义市正安县安场镇前进村龙马溪组剖面(28°40'825"N、107°24'754"E)

和土地垭口石牛栏组剖面(28°34'101"N、E107°26'677"E)。

#### 3.2 分析测试

岩石总有机碳测试, 依照中华人民共和国国家标准《沉积岩中有机碳的测定》(GB/T 19145—2003), 采用美国力可公司生产的 LECO CS744 碳硫仪完成。

全岩 X 衍射分析和黏土矿物 X 射线衍射分析采用中国丹东方圆仪器有限公司生产的 X 线衍射仪, 型号 DX-2700。将样品粉碎至 200 目并制片, 用 40 kV 的测试电压和 20 mA 的电流扫描, Cu 靶, 角扫描范围:  $\theta_s, -15^\circ \sim 80^\circ$ ;  $\theta_d, -5^\circ \sim 80^\circ$ 。扫描完成后, 用 Jade 6.0 软件处理数据, 计算矿物组成。

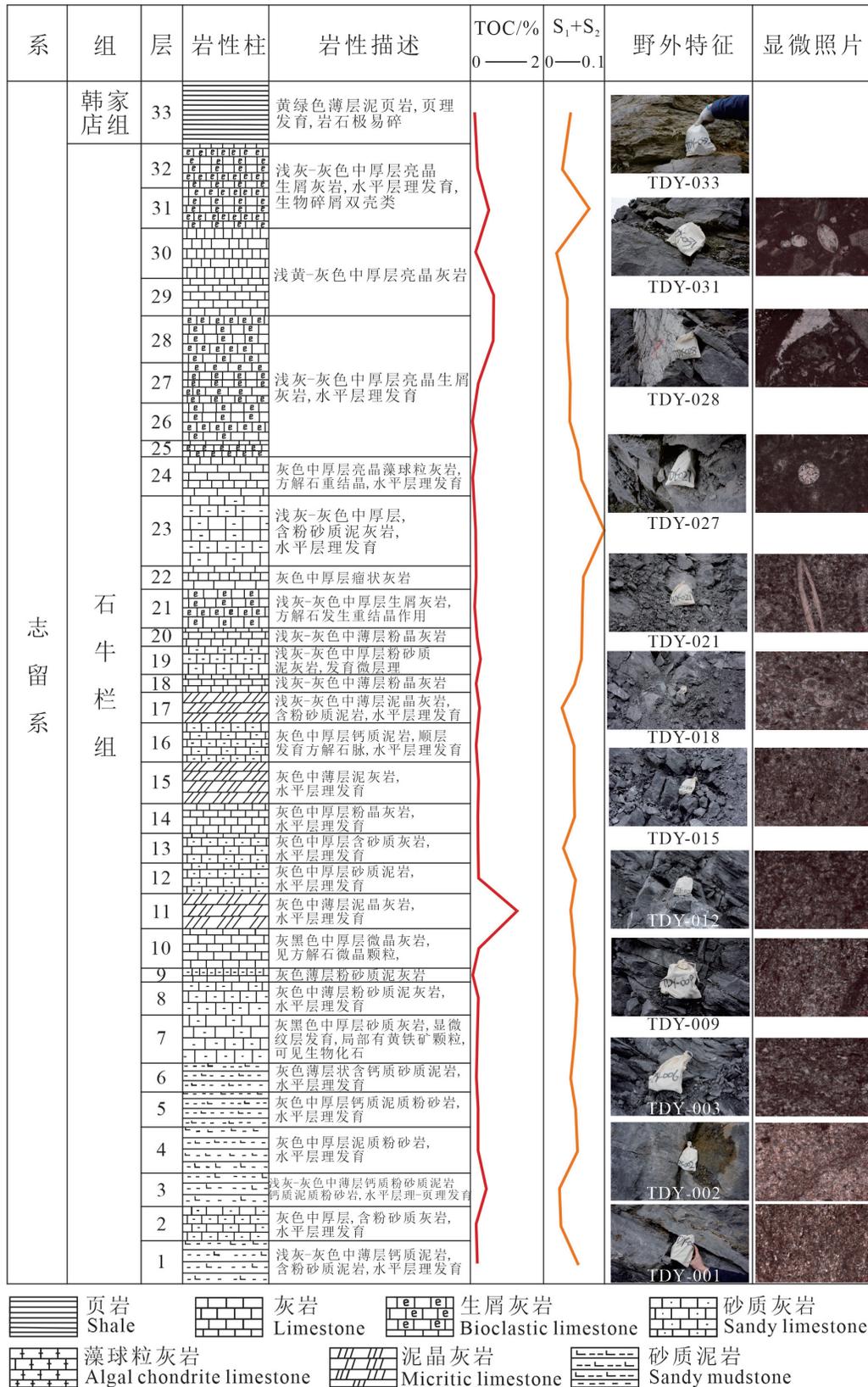


图 2 土地垭口石牛栏组剖面综合柱状图  
Fig.2 Histogram of Shiniulan Formation in Tudiyakou section

表 1 样品清单

Table 1 Sample list

样品号	地点	层位	岩性
TDY-001			灰岩
TDY-002			粉砂质泥灰岩
TDY-003			粉砂质灰岩
TDY-004			粉砂质泥灰岩
TDY-005			钙质粉砂岩
TDY-006			砂质泥灰岩
TDY-007			砂质灰岩
TDY-008			粉砂质泥灰岩
TDY-009			粉砂质泥灰岩
TDY-010			含粉砂质泥灰岩
TDY-011			灰黑色微晶灰岩
TDY-012			砂质灰岩
TDY-013			砂质灰岩
TDY-014			泥晶灰岩
TDY-015			泥晶灰岩
TDY-016		下志留统	砂质灰岩
TDY-017	贵州省遵义市	石牛栏组	泥晶灰岩
TDY-018	土地堰口公路旁		粉砂质灰岩
TDY-019			粉砂质泥灰岩
TDY-020			亮晶灰岩
TDY-021			灰岩
TDY-022			瘤灰岩
TDY-023			灰岩
TDY-024			泥灰岩
TDY-025			泥晶灰岩
TDY-026			泥晶灰岩
TDY-027			瘤灰岩
TDY-028			生屑灰岩
TDY-029			生屑灰岩
TDY-030			生屑灰岩
TDY-031			泥晶灰岩
TDY-032			灰岩
TDY-033		下志留统 韩家店组	泥页岩
SNL-01	安页1井 (2119.64 m)		泥灰岩
SNL-02	安页1井 (2122.07 m)		泥灰岩
SNL-03	安页1井 (2130.35 m)	下志留统 石牛栏组	泥灰岩
SNL-04	安页1井 (2131.32 m)		泥灰岩
SNL-05	安页1井 (2150.15 m)		泥灰岩
QJC-01			黑色页岩
QJC-02			黑色页岩
QJC-03			黑色页岩
QJC-04			碳质页岩
QJC-05			黑色页岩
QJC-06			黑色页岩
QJC-07	贵州省遵义市	下志留统	黑色页岩
QJC-08	安场镇前进村	龙马溪组	黑色页岩
QJC-09			黑色页岩
QJC-10			黑色页岩
QJC-11			黑色页岩
QJC-12			黑色页岩
QJC-13			黑色页岩
QJC-14			黑色页岩
QJC-15			黑色页岩

岩石孔隙度和渗透率测试是根据中华人民共和国国家标准《页岩氦气法孔隙度和脉冲衰减法渗透率的测定》(GB/T 34533—2017), 分别采用美国岩心公司生产的 PDP-200 和 CMS-300 两种仪器进行覆压测试, 围压 1400 psi, 覆压 1000 psi。其中, CMS-300 测试中低渗样品, 而 PDP-200 测试超低渗样品。

扫描电镜分析, 参照前人方法(焦淑静等, 2012; 韩辉等, 2013), 样品经氩离子抛光处理后, 采用德国 Zeiss 公司的 Merlin Compact 扫描电子显微镜, 结合英国 Oxford 的 Aztec One 能谱仪, 对样品的微观形貌及矿物成分进行分析。

Ro 测定, 按照中华人民共和国石油天然气行业标准《沉积岩中镜质体反射率测定方法》(SY/T 5124—2012), 采用美国产 ZEISS CRAIC 20/20 PV<sup>™</sup> 显微分光光度计完成。

氮气吸附脱附实验, 依照中华人民共和国国家标准《气体吸附 BET 法测定固态物质比表面积》(GB/T 19587—2017), 采用美国康塔公司的 Autosorb-IQ-MP 比表面及孔径测定仪完成。将样品碎至粒度小于 250 μm, 放在 150 Pa 的真空条件下脱气四小时以除去杂质气体, 用液氮进行物理等温吸附-脱附实验。实验中相对压力( $P/P_0$ ) 范围为 0.001~0.995, 孔径测量范围为 3.5~500 nm。

## 4 结果部分

### 4.1 岩性特征

石牛栏组是一套巨厚的海相沉积。其岩性从底部到顶部变化较大, 上部是低能沉积环境的产物, 发育有泥质灰岩、泥晶灰岩, 其中泥质条带较为发育; 中部为台地边缘浅滩相沉积, 是储层发育的有利部位, 厚层状生物碎屑灰岩、生物礁灰岩是其主要的岩性特征; 中下部是低能的浅水陆棚沉积, 岩性为瘤状灰岩(周豪等, 2018)。总之, 泥质和粉砂质含量随石牛栏组由上到下越来越少, 而碳酸盐含量却越来越高。

根据野外剖面样品和钻孔岩心的岩石薄片观察, 石牛栏组岩性主要为碳酸盐岩。经过 XRD 分析和显微镜下观察, 页岩的矿物成分主要是方解石、石英和黏土矿物(表 2)。矿物组分差别较大, 其中野外露头样品的方解石含量 16.6%~52.7%, 石英 14.1%~30.8%, 伊利石 11.2%~18.8%, 长石 13%~

26.2%, 高岭石 4.5%~7.6%; 岩心样品的方解石含量 19.4%~48.1%, 石英 14.8%~28.5%, 伊利石 18.7%~24.8%, 长石 11.8%~18.1%, 高岭石 6.5%~9.2%。

#### 4.2 有机质丰度和成熟度

石牛栏组为海相碳酸盐岩, 有机质类型主要以 I 型干酪根为主(翟刚毅等, 2017)。37 个石牛栏组样品的总有机质含量(TOC)测定值为 0.12%~1.26% (图 3), 除个别样品外, 其 TOC 值普遍低于 0.30%, 平均值为 0.28%, 按照海相碳酸盐岩烃源岩有机质丰度的评价标准(表 3), 石牛栏组烃源岩属于差烃源岩。

龙马溪组的总有机碳含量远高于石牛栏组, TOC 值 0.81%~5.71%, 基本上都在 1.0% 以上(图 4),

表 2 矿物分析 (XRD) 数据  
Table 2 Mineral analyzed data by XRD

样品号	方解石/%	石英/%	伊利石/%	长石/%	高岭石/%
SNL-01	48.1	14.8	18.7	11.8	6.5
SNL-05	19.4	28.5	24.8	18.1	9.2
TDY-08	16.6	30.8	18.8	26.2	7.6
TDY-11	45.9	21.2	11.2	17.2	4.5
TDY-31	52.7	14.1	15.5	13	4.6

平均值为 3.1%。按照海相泥质烃源岩有机质丰度的评价标准(表 4), 属于好烃源岩。

评价烃源岩成熟度的指标有很多, 包括孢粉颜色指数(SCI)、岩石热解最高峰温( $T_{max}$ )和镜质体反射率( $R_o$ )等(李志明等, 2010), 最常用的是镜质体反射率。根据 Guo et al.(2019)测定的数据, 石牛栏组的成熟度( $R_o$ )在 2.75%~2.92%, 平均值为 2.95%, 热演化程度较高, 处于过成熟阶段, 具备了大量生成天然气的热演化条件。但鉴于其有机质丰度低, 属于差烃源岩, 其生烃潜力有限。

龙马溪组镜状体的反射率( $R_oM$ )在 1.30%~2.76%(表 5), 根据刘祖发等(1999)提出的经验公式换算, 其等效镜质体反射率( $R_o$ )为 1.39%~2.42%, 平均值为 1.81%。可见, 龙马溪组页岩不仅有有机质丰度高, 还处于生气高峰热演化阶段, 具有良好的生烃潜力。

#### 4.3 孔隙度和渗透率

衡量含油气储层的流体储存和油气运输能力主要通过样品进行孔隙度和渗透率的测试得到。前人(刘若冰等, 2007; 马文辛等, 2012)在显微

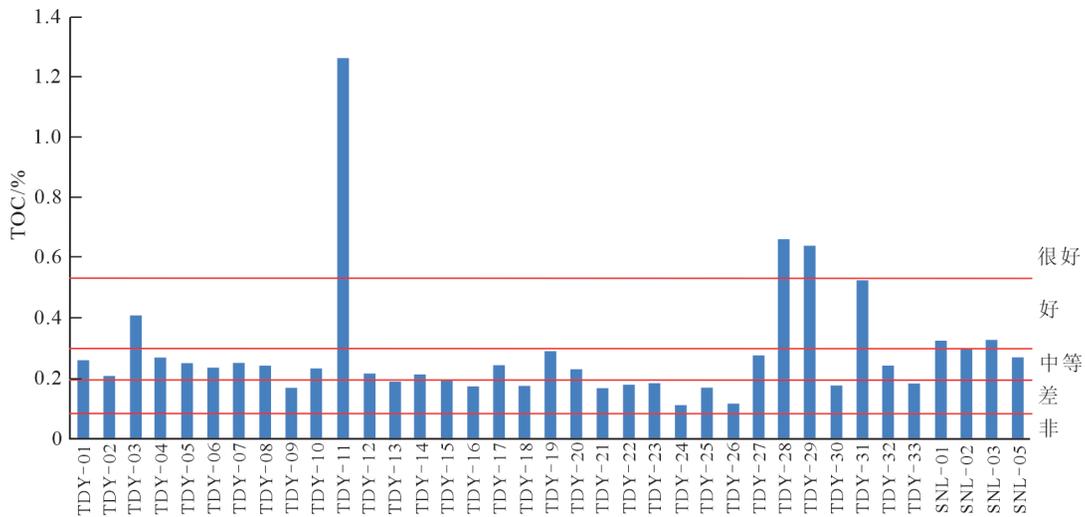


图 3 石牛栏组样品 TOC 分布  
Fig.3 TOC of the Shiniulan Formation samples

表 3 碳酸盐岩烃源岩划分的 TOC 标准 (据秦建中等, 2004)

Table 3 TOC standards of carbonate source rock classification (after Qin Jianzhong et al., 2004)

指标	有机质类型	烃源岩类别				
		很好烃源岩	好烃源岩	中等烃源岩	差烃源岩	非烃源岩
TOC	I	>0.55%	0.3%~0.55%	0.2%~0.3%	0.1%~0.2%	<0.1%
	II <sub>1</sub>	0.9%	0.5%~0.9%	0.25%~0.5%	0.15%~0.25%	<0.15%
	II <sub>2</sub>	1.6%	0.8%~1.6%	0.4%~0.8%	0.25%~0.4%	<0.25%

表 4 海相泥质烃源岩有机质丰度评价标准 (据 Peters, 1986)

评价参数	烃源岩级别				
	非	差	中等	好	很好
TOC	<0.5%	0.5%~1.0%	1.0%~2.0%	2.0%~5.0%	>5.0%

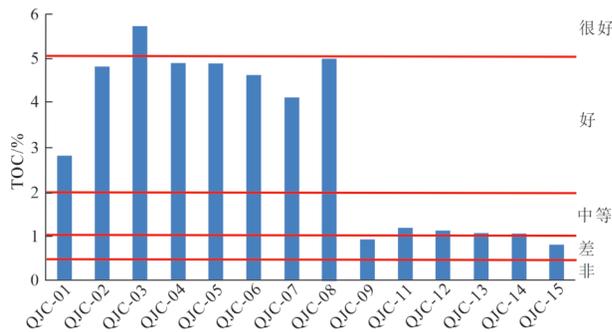


图 4 龙马溪组样品 TOC 值分布

Fig.4 TOC of the Longmaxi Formation samples

表 5 龙马溪组页岩的镜状体反射率 (RoM) 与镜质体反射率 (Ro)

Table 5 RoM and Ro of the Longmaxi Formation

样品编号	RoM/%	Ro/%
QJC-01	1.804	1.641
QJC-02	1.302	1.394
QJC-03	2.148	1.919
QJC-04	1.978	1.782
QJC-05	2.122	1.877
QJC-06	2.006	1.805
QJC-07	2.128	1.903
QJC-08	2.079	1.863
QJC-09	2.761	2.416
QJC-11	1.927	1.741
QJC-12	2.023	1.819
QJC-13	1.94	1.751
QJC-14	2.023	1.818
QJC-15	2.05	1.841

镜下观察发现, 石牛栏组上段的沥青对孔隙有遮挡作用, 大大降低了上段储层的孔隙度和渗透率。

从岩性上看, 龙马溪组的岩性为薄层、中厚层状黑色页岩、碳质页岩、粉砂质页岩, 富含笔石化石, 页理发育(王聚杰, 2016); 石牛栏组从下至上依次为薄—中厚层瘤状灰岩、中层—厚层块状礁灰岩和生屑灰岩为主。周大志等(2009)通过镜下观察认为, 石牛栏组储层经历了同生、早成岩、晚成岩和构造 4 个成岩演化阶段, 压实、胶结和充填等作用破坏了大多数的原生孔隙, 但后期的白云石化、溶蚀作用和破裂作用对储层的孔渗性有了改善。

部分石牛栏组碳酸盐岩样品的覆压孔渗测试结果(表 6)显示, 岩心样品的孔隙度低于露头样品,

表 6 孔隙度、渗透率测试结果

Table 6 Test results of porosity and permeability

样品号	层位	样品来源	孔隙度/%	渗透率/mD
TDY-03	石牛栏组	露头	0.401	0.0000762
TDY-08	石牛栏组	露头	0.255	0.0000727
SNL-04	石牛栏组	岩心	0.125	0.0018683
QJC-03	龙马溪组	露头	5.477	0.0001488
QJC-07	龙马溪组	露头	5.496	0.0001456
QJC-13	龙马溪组	露头	3.299	0.0001867
QJC-08	龙马溪组	露头	8.016	0.0001117

分别为 0.13% 和 0.26%~0.40%; 而岩心样品的渗透率显著高于露头样品, 分别为  $1.87 \times 10^{-3}$  mD 和  $7.72 \times 10^{-5}$ ~ $7.62 \times 10^{-5}$  mD, 相差两个数量级。两者的差异应该是露头样品遭受风化溶蚀作用所致。根据电镜下观察, 石牛栏组岩心样品(图 5a、b、c)中有矿物溶蚀孔, 发育在颗粒内部, 属于次生孔隙。在一定程度上, 这些溶蚀孔隙相互配置, 形成比较好的孔隙通道组合(图 5d、e), 连通性增加, 对改善样品的渗透率起到了重要的作用。长期的表生风化作用, 使得露头样品的粒间孔、粒内孔增多, 结构逐渐松散, 孔隙度增加(陈前等, 2019); 但是, 溶蚀作用同时也破坏其孔隙间的连通性, 导致其渗透率降低。因此, 石牛栏组的孔隙度和渗透率应该用岩心样品的测定结果来评定。

龙马溪组露头样品的孔隙度为 3.30%~8.02%, 平均值 5.55%; 渗透率为  $1.17 \times 10^{-4}$ ~ $1.86 \times 10^{-4}$  mD, 平均值  $1.48 \times 10^{-4}$  mD(表 6), 均显著优于石牛栏组露头样品。龙马溪组页岩属于低孔特低渗储层, 石牛栏组碳酸盐岩属于致密储层。

## 5 储集空间类型

翟刚毅等(2017)发现石牛栏组为致密泥灰岩夹灰质页岩储层, 通过对气藏表现特征和关井恢复情况分析, 其属于高压低渗海相致密天然气藏, 储集空间主要为基质孔隙和微裂缝; 石牛栏组的基质孔隙分为两种: 原生孔隙和溶蚀孔隙; 而且, 在经历了同生、成岩、后生阶段的改造后, 石牛栏组大多数原生孔隙遭到部分或者完全破坏。

扫描电镜下观察到的石牛栏组储集空间有孔隙和微裂缝。其中, 孔隙包括粒内空隙和粒间空隙, 既有原生孔隙, 也有溶蚀孔隙; 微裂缝是石牛栏组的主要储集空间类型, 它与宏孔隙、微孔隙及其自身相互之间的连通构成了裂缝网络系统

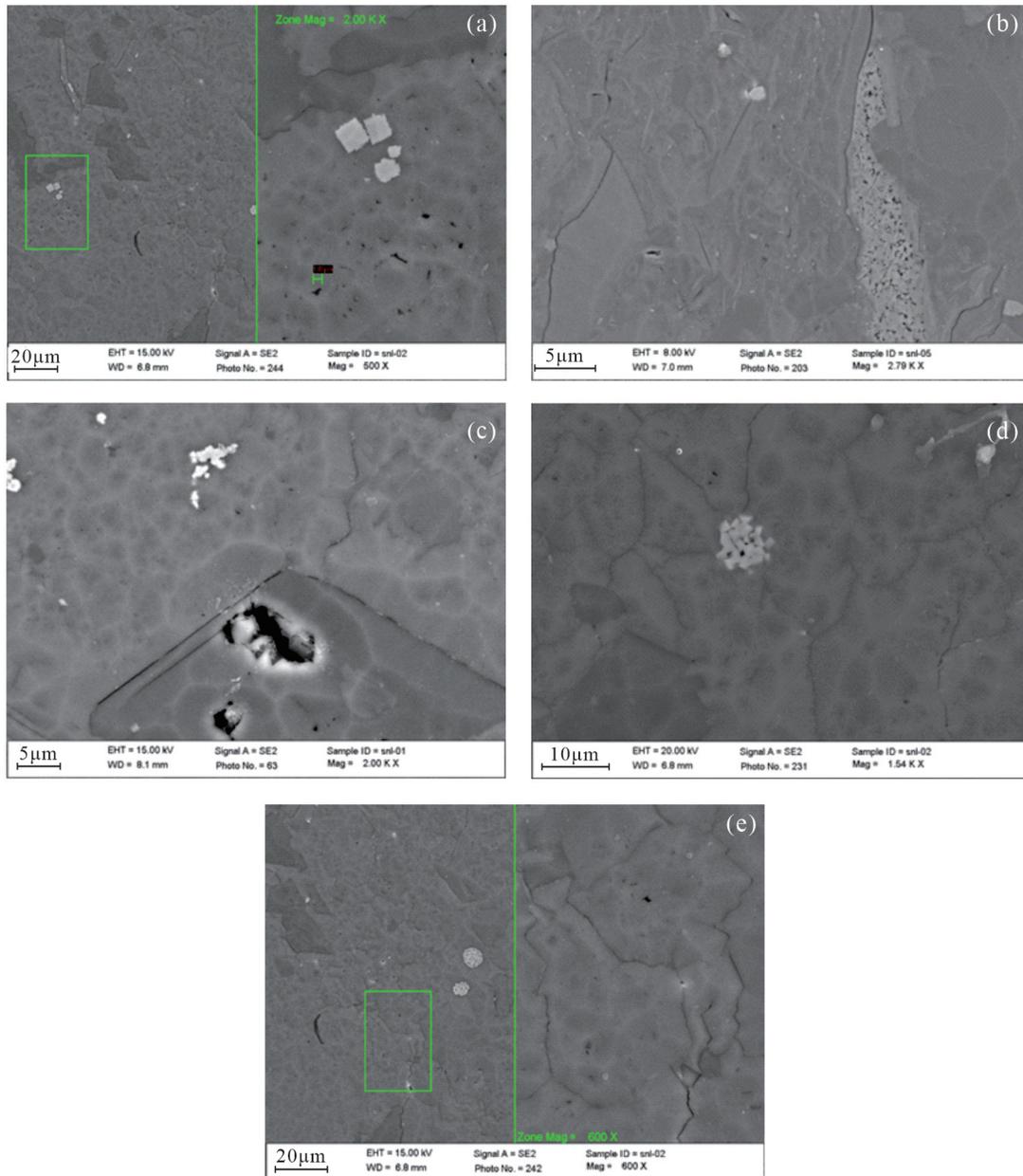


图5 部分石牛栏组样品的扫描电镜分析图像

a—局部放大的溶蚀孔隙(SNL-02); b—磷灰石溶蚀孔隙(SNL-05); c—钠长石溶蚀孔隙(SNL-01); d—黄铁矿晶间孔隙以及丰富的微裂缝网络(SNL-02); e—局部放大的微裂缝网络(SNL-02)

Fig.5 SEM images of Shiniulan Formation samples

a—Locally enlarged dissolution pores (SNL-02); b—Apatite dissolution pores (SNL-05); c—Albite dissolution pores (SNL-01); d—Pyrite intercrystalline pores and abundant micro-crack network (SNL-02); e—Partially enlarged micro-crack network (SNL-02)

(图5d、e)。

### 5.1 孔隙结构

多孔介质在吸附-脱附过程中,由于孔隙在发生毛细凝聚和蒸发时的相对压力不对等,会发生脱附曲线滞后(徐勇等,2015),形成吸附-脱附回线。不同类型孔隙的形态和连通性有差异,因而形成不

同的吸附-脱附回线。因此,通过观察氮气吸附等温线中的吸附曲线和脱附曲线的分离情况,可以获得多孔介质的孔隙结构特征。

国际纯化学与应用化学联合会(IUPAC)将吸附-脱附回线分为4类,分别表征不同的孔隙结构类型(图6)。对石牛栏组的土地垭口露头样品

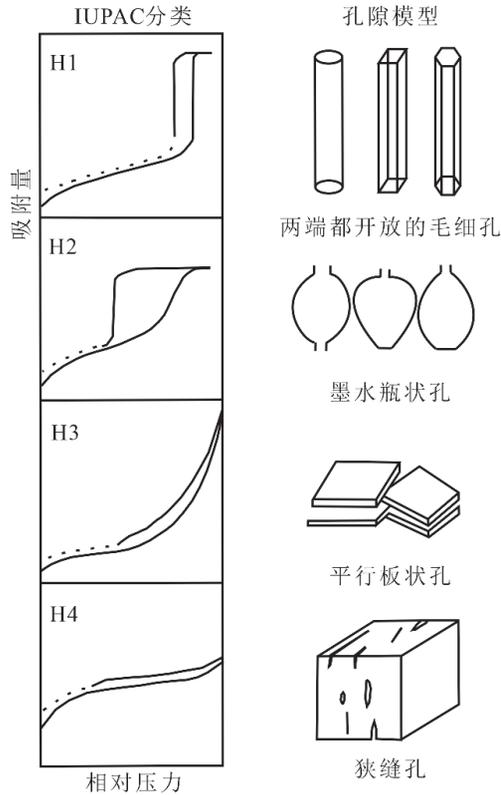


图 6 氮气吸附-脱附回线 IUPAC 分类  
Fig.6 Nitrogen adsorption stripping loop classified by IUPAC

TDY-03 和安页 1 井岩心样品 SNL-04 进行了低温氮气吸附实验, 得到的吸附-脱附曲线(图 7)表明, 石牛栏组的样品(露头 and 岩心样品)在相对压力接近于 1 的时候, 吸附分支和脱附分支平行于压力轴; 相对压力在接近 0.5 时, 脱附分支上出现有拐点, 回线与 IUPAC 分类的 H4 型相似, 即主要表现出狭缝型孔隙特征, 同时含少量墨水瓶状孔。这与在扫描电镜下观察到的石牛栏组孔隙是以微裂缝和溶蚀孔隙为主的结果相一致。

### 5.2 孔容、孔径分布与比表面积

页岩吸附能力和含气性可以通过孔容、孔径分

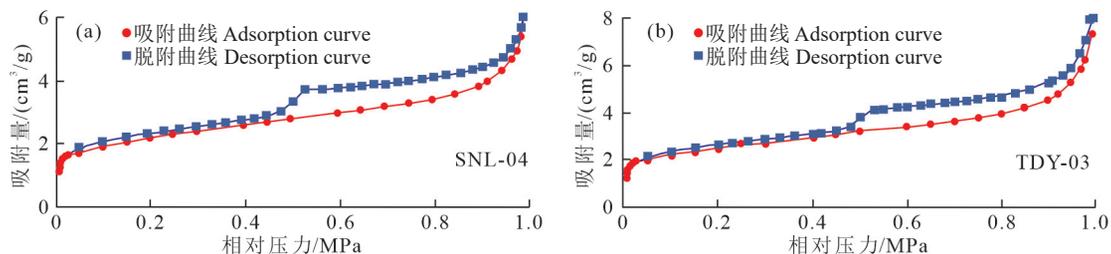


图 7 样品的氮气吸附脱附曲线  
Fig.7 Nitrogen adsorption stripping curve of samples

布与比表面积来进行反映, 主要是通过氮气吸附实验和计算模型的综合使用获得结果。具体来看, 比表面积计算是采用多点 BJH 模型线性回归得到, 孔径分布是采用 BJH 法计算获得。

氮气吸附实验结果见表 7。比表面积: 岩心样品为  $7.77 \text{ m}^2/\text{g}$ , 露头样品为  $9.08 \text{ m}^2/\text{g}$ ; 孔容: 岩心样品为  $1.25 \text{ mm}^3/\text{g}$ , 露头样品为  $9.20 \text{ mm}^3/\text{g}$ ; 平均孔径: 岩心样品为  $4.74 \text{ nm}$ , 露头样品为  $5.49 \text{ nm}$ 。

不同孔径的孔体积和比表面积贡献值直方图(图 8)可以直观地反映石牛栏组碳酸盐岩微孔、中孔和大孔对孔体积和比表面积的贡献。对比岩心样品 SNL-04 和露头样品 TDY-03 发现: 两者中对孔隙体积贡献最大的都是中孔, 微孔和宏孔的贡献较小, 其中, 露头样品的微孔贡献大于宏孔贡献, 而岩心样品的宏孔贡献大于微孔贡献; 在比表面积贡献方面, 岩心样品中贡献最大的也是中孔, 微孔和宏孔的贡献很小, 但露头样品的微孔贡献大于中孔, 宏孔贡献非常微小。如前所述, 岩心样品的渗透率高于露头样品是因为露头样品遭受风化溶蚀作用所致, 结合实验数据, 笔者进一步认为, 露头样品遭受的风化溶蚀作用主要影响中孔和宏孔, 造成其孔壁面积大幅减小。

综上, 石牛栏组碳酸盐岩的孔容、孔径分布与比表面积特征应用岩心样品的数据来表征, 而不是露头样品。因此, 中孔是石牛栏组天然气储集的主要贡献者, 微孔和宏孔的贡献有限。

## 6 讨论

### 6.1 石牛栏组天然气的来源

安页 1 井石牛栏组在钻探过程中的全烃异常值最高为 85.40%, 甲烷异常值最高 80.50%, 中途裸眼测试最大瞬时流量  $42.01 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ , 后经压裂测试

表 7 样品的氮气吸附法孔隙结构参数

Table 7 Pore structure parameters by nitrogen adsorption method

样品编号	比表面积/(m <sup>2</sup> /g)	孔容/(mm <sup>3</sup> /g)	平均孔径/nm
SNL-04	7.770	9.201	4.736
TDY-03	9.078	1.246	5.489

获得日产  $10.22 \times 10^4 \text{ m}^3$  的高产气流(翟刚毅等, 2017)。Guo et al.(2019)根据美国矿业局 USBM 方法对安页 1 井石牛栏组样品进行现场解析, 获得的解析气量为  $0.07 \sim 0.84 \text{ m}^3/\text{t}$ , 并通过恢复计算, 认为其原位气量可以达到  $3.67 \text{ m}^3/\text{t}$ 。

然而, 笔者测定的石牛栏组样品的 TOC 平均值仅约为 0.3%。翟刚毅等(2017)报道的安页 1 井石牛栏组岩心的 TOC 值更低, 在 0.04%~0.11%。虽然石牛栏组具备了大量生成甲烷气的热演化条件 ( $R_o$  平均值 2.95%), 但是如此低的有机碳含量, 其生烃能力根本不足以提供其目前所储存的气量, 不足以支撑其产气能力。因此, 石牛栏组中的天然气必有其他来源, 这一点已被 Guo et al.(2019)注意到。初步推断, 石牛栏组天然气主要来源于其下伏龙马溪组, 自身贡献部分较少。理由如下:

(1) 龙马溪组是一套优质的烃源岩, 生烃潜力良好, 总有机碳含量的平均值为 3.07%, 属于好烃源岩, 且其等效镜质体反射率平均值为 1.81%, 处于生气高峰热演化阶段, 具备足够的供气能力。

(2) 虽然石牛栏组的孔隙度 (0.26%~0.40%, 露头样品 0.125%) 小于龙马溪组 (3.30%~8.02%, 露头样品), 但其渗透率 ( $1.86 \times 10^{-3} \text{ mD}$ ) 表明其具备接收来自龙马溪组天然气的运移通道物性条件。其中, 石牛栏组本身的“狭缝型”储集空间有效降低了油气运移和渗流时的毛管阻力, 为龙马溪组的油气向

石牛栏组运移提供了有利条件。李双建等(2009)研究指出, 石牛栏组上段充注的沥青来源于下伏地层龙马溪组, 证实两者间的确是存在运移通道的。

(3) 石牛栏组天然气的五峰组—龙马溪组有机质来源可以通过对两者的碳、氢同位素组成和分子组成进行关联 (Berner and Faber, 1988; Chung et al., 1988) 而得到有效识别。Guo et al.(2019)将石牛栏组甲烷和乙烷的  $\delta^{13}\text{C}$  数据在天然气成因判识模板上进行投点, 落在碳同位素倒转区, 说明石牛栏组的天然气是混源型气体。安页 1 井天然气甲烷和乙烷的  $\delta^{13}\text{C}$  平均值分别为 -33.5‰ 和 -36.7‰, 与牛强等(2020)报道的四川盆地南部五峰组—龙马溪组页岩相近, 这是对石牛栏组天然气与五峰组—龙马溪组有机质具有良好的碳源关系观点的有力支持。

## 6.2 石牛栏组天然气成藏

李双建等(2009)通过对与石牛栏组沥青伴生的盐水包裹体进行研究, 得到石牛栏组古油藏的充注时间是 200 Ma, 表明其发生在晚三叠世—早侏罗世。结合研究区的构造发展历程(郭英海等, 2004), 大致可推测石牛栏组天然气的成藏过程为:

(1) 龙马溪组有机质在晚二叠世达到成熟热演化阶段, 开始生油。

(2) 在晚三叠世—早侏罗世, 受印支运动的影响, 石牛栏组形成大量狭缝型构造缝, 导致下伏龙马溪组液态烃进入石牛栏组的上段礁滩相生屑灰岩中形成圈闭古油藏(图 9a)。

(3) 早白垩世燕山运动导致晚白垩之前的地层普遍发生褶皱断裂, 石牛栏组上部的古油藏遭到破坏, 并且残留下干沥青, 使得其原有储层物性变差,

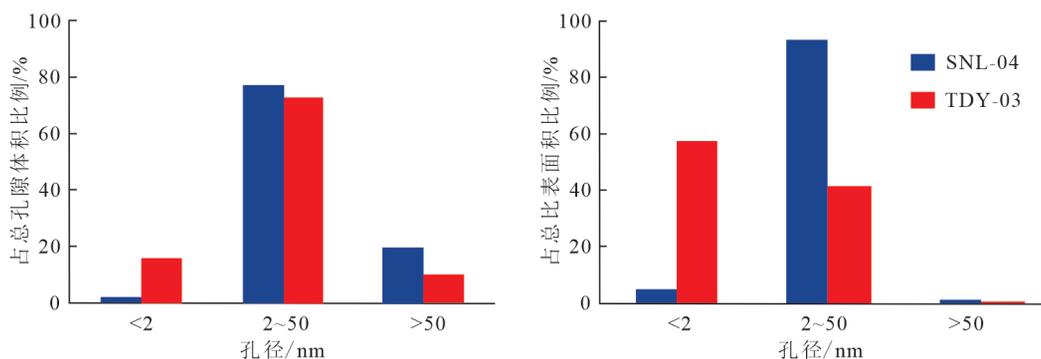


图 8 微孔、中孔和宏孔对孔体积和比表面积的贡献率  
Fig.8 Contribution of different size pores to pore surface area and pore volume

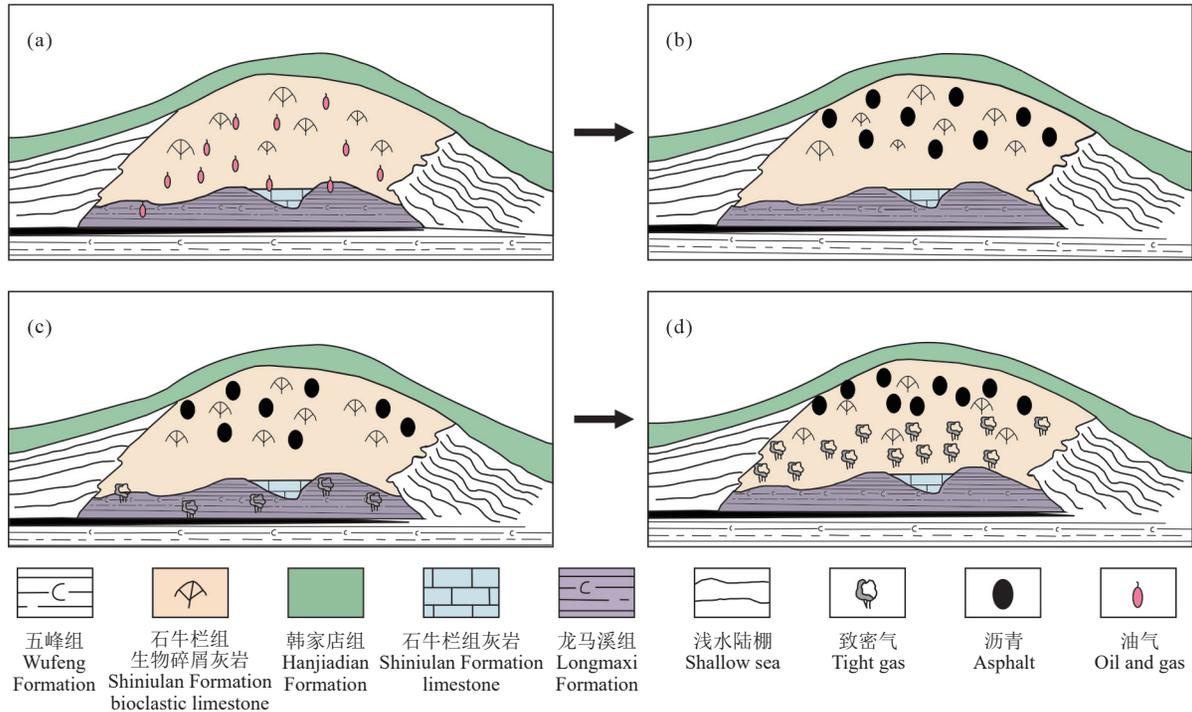


图 9 石牛栏组天然气藏形成过程

Fig.9 Process of natural gas reservoir formation in the Shiniulan Formation

形成封堵能力(图 9b)。

(4)晚白垩世,龙马溪组有机质达到过成熟热演化阶段,开始大规模生气(图 9c)。之后受喜马拉雅运动的影响,生成的天然气经过调整进入石牛栏组地层,主要储集在其狭缝型中孔里,最终形成了现在的逆断层封堵的残留向斜致密气藏(图 9d)。

总之,石牛栏组属于构造成因的狭缝型储层,主要的有利储集层段是其下段;其上段的生物礁相生屑灰岩在古油藏充注前可能是有利储层,但是后期由于古油藏被破坏,残余的沥青占据了其原来的储集空间,加之压溶压实和重结晶作用致使其变得致密,成为石牛栏组下部储层的遮挡层,最终使得从龙马溪组生成的部分天然气经后期构造运动充注其中并很好地保存下来。

## 7 结 论

(1)黔北武陵山地区安场向斜下志留统石牛栏组是一套巨厚的海相沉积,岩性主要为碳酸盐岩,矿物成分以方解石、石英和黏土矿物为主。其下部主要为薄—中厚层瘤状灰岩,上部以中层—厚层块状礁灰岩、生屑灰岩为主。

(2)石牛栏组天然气藏的储集空间位于其下段,主要为基质孔隙和微裂缝,孔隙类型以狭缝孔为主,其中对碳酸盐岩储层孔体积和比表面积贡献最大的是中孔。这种“狭缝型”储集空间降低了油气运移和渗流时的毛管阻力,为龙马溪组的天然气向石牛栏组运移提供了有利条件。

(3)石牛栏组上段的生屑灰岩、礁灰岩本来是良好的油气储层,并在晚三叠世—早侏罗世接受了来自龙马溪组的液态烃充注,形成了古油藏,但在早白垩世燕山运动期间遭受破坏,残留的沥青将大部分的孔隙堵死,再加上压溶和重结晶的改造作用使其物性条件进一步恶化,以致为其下段的后续气藏充注提供了封盖条件。

## References

- Berner U, Faber E. 1988. Maturity related mixing model for methane, ethane and propane, based on carbon isotopes[J]. *Organic Geochemistry*, 13(1/3): 67–72.
- Chen Qian, Yan Xiangbin, Zhang Jinchuan, Li Wanjun, Guo Yuanling, Hong Taiyuan, Wang Ruyue, Pan Ting. 2019. The transformation effect of weathering on shale pores: Taking the Lower Cambrian Niutitang Formation in northern Hunan as an example[J]. *Natural Gas Industry*, 39(10): 32–41 (in Chinese with English abstract).

- Chung H M, Gormly J R, Squires R M. 1988. Origin of gaseous hydrocarbons in subsurface environments: theoretical considerations of carbon isotope distribution[J]. *Chemical Geology*, 71(1/3): 97–104.
- Ge Mingna, Pang Fei, Bao Shujing. 2019. Microscopic view of Wufeng Formation–Longmaxi Formation shale in Zunyi, Guizhou Province and its control on gas-bearing properties–Taking Anye 1 as an example[J]. *Petroleum Experimental Geology*, 41(1): 23–30 (in Chinese with English abstract).
- Ge Mingna, Ren Shoumai, Guo Tianxu, Wang Shengjian, Zhou Zhi. 2020. Identification method and application of "high-quality interval" of Lower Paleozoic marine shale gas in southern China[J]. *Rock and Mineral Testing*, 39(3): 350–361 (in Chinese with English abstract).
- Gu J, Huang Z L, Fan H P, Jin Z G, Yan Z F, Zhang J W. 2013. Mineralogy, geochemistry, and genesis of lateritic bauxite deposits in the Wuchuan–Zheng'an–Daozhen area, Northern Guizhou Province, China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 130(1): 44–59.
- Guo R, Zhang J, Zhao P, Tang X, Liu Z. 2019. Accumulation conditions and an analysis of the origins of natural gas in the Lower Silurian Shiniulan Formation from Well Anye 1, northern Guizhou Province[J]. *Energies*, 12(21): 4087.
- Guo Yinghai, Li Zhuangfu, Li Dahua, Zhang Tianmo, Wang Zecheng, Yu Jifeng, Xi Yantao. 2004. Early Silurian lithofacies palaeogeography in Sichuan area[J]. *Journal of Palaeogeography*, 6(1): 20–29 (in Chinese with English abstract).
- Han Hui, Zhong Ningning, Jiao Shujing, Ma Yong, Wang Qi, Huang Xiaoyan, Zhu Shunling, Yao Lipeng. 2013. Scanning electron microscope observation of shale pores[J]. *Chinese Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, 32(4): 325–330 (in Chinese with English abstract).
- Hong Haitao, Tian Xingwang, Sun Yiting, Ma Kui, Li Geng, Wang Yunlong, Yang Dailin, Peng Hanlin, Luo Bing, Zhou Gang, Xue Jiuhuo, Ye Mao, Shan Shujiao. 2020. Enrichment law of marine carbonate natural gas in Sichuan Basin[J]. *Geology in China*, 47(1): 99–110 (in Chinese with English abstract).
- Jiao Shujing, Han Hui, Weng Qingping, Yang Feng, Jiang Daqiang, Cui Lishan. 2012. Scanning electron microscope analysis method of shale pore structure[J]. *Chinese Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, 31(5): 432–436 (in Chinese with English abstract).
- Li Shuangjian, Zhou Yan, Xiao Kaihua, Wo Yujin, Wang Xinwei, Liu Quanyou. 2009. Characteristics of Silurian paleo-reservoir in Xishuihoutan, southeastern Sichuan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 30(6): 849–855 (in Chinese with English abstract).
- Li Zhiming, Xu Ershe, Qin Jianzhong, Zheng Lunju, Bao Yunjie. 2010. Several problems in the evaluation of source rocks[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 25(6): 8–12,27,108 (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. 2024. Shale gas accumulation conditions and exploration prospects of Wufeng–Longmaxi Formation in Shixi Area, Northern Guizhou[J]. *Geology in China*, 51(3): 728–742 (in Chinese with English abstract).
- Liu Ruobing, Tian Jingchun, Huang Yong, Wei Zhihong, Wan Xianli. 2007. Reservoir characteristics of the Sinian Dengying Formation dolomite and Silurian Shiniulan Formation limestone reservoirs in southeastern Sichuan[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Natural Science Edition)*, 34(3): 245–250 (in Chinese with English abstract).
- Liu Zufa, Xiao Xianming, Fu Jiamo, Liu Dehan, Shen Jiagui. 1999. The use of marine vitrinite reflectance as an indicator of Early Paleozoic source rock maturity[J]. *Geochemistry*, 28(6): 280–288 (in Chinese with English abstract).
- Ma Wenxin, Liu Shugen, Huang Wenming, Zhang Changjun, Xu Guosheng, Yuan Haifeng. 2012. Characteristics of Silurian paleo-reservoirs in the southeastern margin of the Sichuan Basin and their significance for oil and gas exploration[J]. *Oil and Gas Geology*, 33(3): 432–441 (in Chinese with English abstract).
- Niu Qiang, Zhang Huanxu, Zhu Di, Xu Zhiyao, Yang Yunfeng, Ding Anxu, Gao Hequn, Zhang Lisheng. 2020. Carbon isotope characteristics of shale gas logging in Wufeng Formation and Longmaxi Formation in southeastern Sichuan and their geological significance[J]. *Natural Gas Geoscience*, 31(9): 1294–1305 (in Chinese with English abstract).
- Peters K E. 1986. Guideline of evaluating petroleum source rock using programmed pyrolysis[J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 70(3): 318–329.
- Qin Jianzhong, Liu Baoquan, Guo Jianying, Liu Jingwang, Yu Guoying, Guo Shuzhi. 2004. Evaluation criteria for carbonate source rocks[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 26(3): 281–286 (in Chinese with English abstract).
- Sun Wenfeng, Li Wei, Dong Zhiyu, Yan Tie, Li Yue, Li Shichang. 2017. New exploration of shale pore structure characterization methods[J]. *Lithologic Reservoirs*, 29(2): 125–130 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jianhui. 2008. Research on Sedimentary Facies and Reservoir Characteristics of Shiniulan Formation in Southeastern Sichuan[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 1–80 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jujie. 2016. Comparative Study of Shale Gas Geological Conditions in Typical Sections of Longmaxi Formation and Niutitang Formation in Southern China[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 1–68 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qin, Qian Menhui, Jiang Qigui, Yang Yunfeng, Tengger. 2017. Research on the hydrocarbon generation ability of graptolite in marine source rocks in southern China[J]. *Rock and Mineral*

- Testing, 36(3): 258–264 (in Chinese with English abstract).
- Xu Yong, Lu Chengfu, Chen Guojun, Zhong Jiaai, Yang Wei, Xue Lianhua. 2015. Fractal characteristics of shale pores in Longmaxi Formation in Southeast Sichuan[J]. Lithologic Reservoirs, 27(4): 32–39 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Gangyi, Bao Shujing, Pang Fei, Ren Shoumai, Chen Ke, Wang Yufang, Zhou Zhi, Wang Shengjian. 2017. Research on the "four-story" shale oil and gas accumulation model of the Anchang syncline in Zunyi area, Guizhou[J]. Geology in China, 44(1): 1–12 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Dazhi, Li Guorong, Luo Peng, Zhang Demin, Tang Hongwei. 2009. Research on the rock formation of the Silurian Shiniulan in southeastern Sichuan[J]. Natural Gas Technology, 3(6): 7–11 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Hao, Wang Ganlu, Xia Peng, Si Haiying, Wang Shuai, Luo Teng. 2018. Reservoir characteristics of the Lower Silurian Shiniulan Formation in the second block of Fenggang, North Guizhou[J]. Contributions to Geological Prospecting, 33(4): 611–616 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈前, 闫相宾, 张金川, 李婉君, 郭元岭, 洪太元, 王岳岳, 潘艇. 2019. 风化作用对页岩孔隙的改造作用——以湘北地区下寒武统牛蹄塘组为例[J]. 天然气工业, 39(10): 32–41.
- 葛明娜, 庞飞, 包书景. 2019. 贵州遵义五峰组—龙马溪组页岩微观及其对含气性控制——以安页 1 井为例[J]. 石油实验地质, 41(1): 23–30.
- 葛明娜, 任收麦, 郭天旭, 王胜建, 周志. 2020. 中国南方下古生界海相页岩气“优质层段”识别方法与应用[J]. 岩矿测试, 39(3): 350–361.
- 郭英海, 李壮福, 李大华, 张天模, 汪泽成, 余继峰, 奚砚涛. 2004. 四川地区早志留世岩相古地理[J]. 古地理学报, 6(1): 20–29.
- 韩辉, 钟宁宇, 焦淑静, 马勇, 王琪, 黄小艳, 朱顺玲, 姚立鹏. 2013. 泥页岩孔隙的扫描电子显微镜观察[J]. 电子显微学报, 32(4): 325–330.
- 洪海涛, 田兴旺, 孙奕婷, 马奎, 李庚, 王云龙, 杨岱林, 彭瀚霖, 罗冰, 周刚, 薛玖火, 叶茂, 山述娇. 2020. 四川盆地海相碳酸盐岩天然气富集规律[J]. 中国地质, 47(1): 99–110.
- 焦淑静, 韩辉, 翁庆萍, 杨峰, 姜大强, 崔立山. 2012. 页岩孔隙结构扫描电镜分析方法研究[J]. 电子显微学报, 31(5): 432–436.
- 李双建, 周雁, 肖开华, 沃玉进, 汪新伟, 刘全有. 2009. 四川盆地东南缘习水吼滩志留系古油藏特征[J]. 石油学报, 30(6): 849–855.
- 李志明, 徐二社, 秦建中, 郑伦举, 鲍云杰. 2010. 烃源岩评价中的若干问题[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 25(6): 8–12, 27, 108.
- 刘若冰, 田景春, 黄勇, 魏志宏, 万贤莉. 2007. 川东南震旦系灯影组白云岩与志留系石牛栏组灰岩储层特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 34(3): 245–250.
- 刘祖发, 肖贤明, 傅家谟, 刘德汉, 申家贵. 1999. 海相镜质体反射率用作早古生代烃源岩成熟度指标研究[J]. 地球化学, 28(6): 580–588.
- 马文辛, 刘树根, 黄文明, 张长俊, 徐国盛, 袁海锋. 2012. 四川盆地东南缘志留系古油藏特征及其油气勘探意义[J]. 石油与天然气地质, 33(3): 432–441.
- 牛强, 张焕旭, 朱地, 徐志尧, 仰云峰, 丁安徐, 高和群, 张立生. 2020. 川东南五峰组—龙马溪组页岩气录井碳同位素特征及其地质意义[J]. 天然气地球科学, 31(9): 1294–1305.
- 秦建中, 刘宝泉, 国建英, 刘井旺, 于国营, 郭树芝. 2004. 关于碳酸盐烃源岩的评价标准[J]. 石油实验地质, 26(3): 281–286.
- 孙文峰, 李玮, 董智煜, 闫铁, 李悦, 李世昌. 2017. 页岩孔隙结构表征方法新探索[J]. 岩性油气藏, 29(2): 125–130.
- 汪建辉. 2008. 川东南地区石牛栏组沉积相及储层特征研究[D]. 成都: 成都理工大学, 1–80.
- 王聚杰. 2016. 中国南方龙马溪组与牛蹄塘组典型剖面页岩气地质条件对比研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 1–68.
- 王勤, 钱门辉, 蒋启贵, 仰云峰, 腾格尔. 2017. 中国南方海相烃源岩中笔石生烃能力研究[J]. 岩矿测试, 36(3): 258–264.
- 徐勇, 吕成福, 陈国俊, 仲佳爱, 杨巍, 薛莲花. 2015. 川东南龙马溪组页岩孔隙分形特征[J]. 岩性油气藏, 27(4): 32–39.
- 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.
- 周大志, 李国蓉, 罗鹏, 张德民, 汤鸿伟. 2009. 川东南志留系石牛栏组成岩作用研究[J]. 天然气技术, 3(6): 7–11.
- 周豪, 王甘露, 夏鹏, 司海瀛, 王帅, 罗腾. 2018. 黔北凤冈二区块下志留统石牛栏组储层特征研究[J]. 地质找矿论丛, 33(4): 611–616.