

# 川南地区志留系石牛栏组古地貌格局 及沉积演化特征\*

张本健<sup>1</sup> 周刚<sup>1</sup> 钟原<sup>1</sup> 汪华<sup>1</sup> 戴鑫<sup>1</sup> 乔艳萍<sup>1</sup> 张自力<sup>1</sup>  
兰才俊<sup>1</sup> 陈龙<sup>2</sup> 余信<sup>2</sup> 罗龙<sup>2,3</sup> 刘建平<sup>2,3</sup> 谭先锋<sup>2,3</sup>

1 中国石油西南油气田公司勘探开发研究院, 四川成都 610051

2 重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆 401331

3 复杂油气田勘探开发重庆市重点实验室, 重庆 401331

**摘要** 四川盆地志留系龙马溪组烃源岩的厚度中心位于川南地区, 其上覆石牛栏组石灰岩具备近源成藏的巨大优势, 然而当前尚未取得石牛栏组规模储集层勘探突破。研究基于大量的钻测井、岩心、露头及三维地震资料, 通过地层学、沉积学及地球物理学等方法手段, 开展川南地区石牛栏组古地貌格局及沉积演化特征研究。结果表明: (1) 川南地区石牛栏组自南向北发育南部高带、中部洼地及北部高带 3 个古地貌单元, 明确了 3 个古地貌单元的平面分布范围; (2) 3 个古地貌单元控制了川南地区石牛栏组沉积相带的展布, 南、北 2 个构造高部位发育礁滩体及碳酸盐岩台地等高能沉积相带, 以生物碎屑灰岩、生物礁(珊瑚)灰岩、鲕粒灰岩、砂屑灰岩等岩性发育为主要特征, 中部洼地主要发育泥质浅水陆棚泥岩夹薄层灰质泥岩、泥灰岩沉积, 石牛栏组碳酸盐礁滩体是该区油气储集层预测的重要目标; (3) 早志留世川中隆起、黔中隆起的抬升隆起塑造了石牛栏组古地貌及沉积格局, 随着川中隆起、雪峰古陆的持续活动以及陆源供给增强, 伴随着海平面持续下降则导致石牛栏组碳酸盐岩台地的逐渐消亡, 至韩家店组则发育 1 套海相碎屑岩沉积。希望通过本次研究, 能够为该区石牛栏组油气勘探开发提供一定的理论参考。

**关键词** 沉积演化 古地貌 生物礁 油气勘探 石牛栏组 四川盆地

**第一作者简介** 张本健, 男, 1980 年生, 博士, 高级工程师, 主要从事石油与天然气勘探研究及技术管理工作。E-mail: zbjian@petroChina.com.cn。

**通讯作者简介** 兰才俊, 男, 博士, 工程师, 主要从事海相碳酸盐岩含油气地质条件研究及勘探部署工作。E-mail: lcj0313@petroChina.com.cn。

中图分类号: P531; P624 文献标志码: A

## Palaeogeomorphic pattern and sedimentary evolution of the Silurian Shiniulan Formation in southern Sichuan Basin

ZHANG Benjian<sup>1</sup> ZHOU Gang<sup>1</sup> ZHONG Yuan<sup>1</sup> WANG Hua<sup>1</sup> DAI Xin<sup>1</sup> QIAO Yanping<sup>1</sup> ZHANG Zili<sup>1</sup>

\* 中国石油天然气股份有限公司重大科技专项 (编号: 2023ZZ16)、国家自然科学基金 (编号: U2344209, 42072140, 42202170, 42102133)、重庆市杰出青年科学基金 (编号: CSTB2022NSCQ-JQX0031) 和重庆市教委科技重大项目 (编号: KJZD-M202101502) 共同资助。[Co-funded by Major Science and Technology Project of CNPC (No. 2023ZZ16), National Natural Science Foundation of China (Nos. U2344209, 42072140, 42202170, 42102133), Chongqing Outstanding Youth Science Foundation (No. CSTB2022NSCQ-JQX0031) and Major Science and Technology Project of Chongqing Education Commission (No. KJZD-M202101502)]

收稿日期: 2024-02-09 改回日期: 2024-06-27

LAN Caijun<sup>1</sup> CHEN Long<sup>2</sup> YU Xin<sup>2</sup> LUO Long<sup>2,3</sup> LIU Jianping<sup>2,3</sup> TAN Xianfeng<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> *Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu 610051, China*

<sup>2</sup> *School of Petroleum Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China*

<sup>3</sup> *Chongqing Key Laboratory of Complex Oil and Gas Exploration and Development, Chongqing 401331, China*

**Abstract** The southern Sichuan Basin represents the depocenter of the Silurian Longmaxi Formation, a regionally significant hydrocarbon source rock. The overlying Shiniulan Formation limestone has significant advantages for near-source hydrocarbon accumulation. However, no significant breakthrough has yet been achieved in the exploration of large-scale reservoirs in this interval. The study focuses on the geological and sedimentary characteristics of the Shiniulan Formation. Using drilling, core, outcrop, and 3D seismic data, the palaeogeomorphic framework and sedimentary evolution were reconstructed. The results show that the study area can be divided into three geomorphic units: the southern high zone, the central depression, and the northern high zone. These geomorphic features strongly control the spatial distribution of sedimentary facies within the Shiniulan Formation. The high zones are characterized by carbonate platform and reef deposits, which are the main targets for oil and gas reservoir prediction. The central depression dominantly consists of mudstone and mixed shelf deposits. The uplifts of the Chuanzhong and Qianzhong during the Early Silurian period shaped the palaeogeomorphy and sedimentary pattern of the Shiniulan Formation. The continuous activity of the Chuanzhong uplift and the enhanced terrestrial input from the Xuefeng ancient land and the falling sea-level led to the demise of the carbonate platform. These findings offer a theoretical framework and predictive insights for future hydrocarbon exploration and development in the Shiniulan Formation.

**Key words** sedimentary evolution, palaeogeomorphy, reef, petroleum exploration, Shiniulan Formation, Sichuan Basin

**About the first author** ZHANG Benjian, is a Ph.D. and senior engineer. He is mainly engaged in research and technical management in the field of petroleum and natural gas exploration. E-mail: zbjian@petroChina.com.cn.

**About the corresponding author** LAN Caijun, is a Ph.D. and engineer. He is mainly engaged in research on geological conditions for oil & gas in marine carbonate reservoirs and exploration. E-mail: lcj0313@petroChina.com.cn.

海相碳酸盐岩油气藏在世界油气资源中具有重要地位。全球碳酸盐岩储集层中的油气储量约占油气总储量的 40%，产量约占油气总产量的 60%（白国平，2006）。中国碳酸盐岩油气藏主要分布于四川盆地、塔里木盆地、鄂尔多斯盆地及渤海湾盆地，分布面积近  $3 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，第 3 轮油气资源评价碳酸盐岩油气资源总量原油为  $340 \times 10^8 \text{ t}$ 、天然气为  $24.3 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，油气资源丰富，勘探潜力巨大，是中国油气勘探战略接替区之一（张宁宁等，2014；倪新锋等，2018）。

志留系龙马溪组暗色泥页岩是四川盆地的主力烃源岩层系（马永生等，2018；马新华等，2020；

孙焕泉等，2020），位于川南地区的自贡、泸州等地是龙马溪组烃源岩的厚度中心，该区龙马溪组之上的石牛栏组具有近源成藏的巨大优势。川南地区泸州、自贡、长宁等地多口钻井揭示了石牛栏组具有良好的油气显示，且川南桐 18 井取心资料指示了石牛栏组具备形成优质碳酸盐岩储集层的潜力，但目前川南地区石牛栏组油气勘探尚未发现规模油气储集层（白壮壮等，2023）。

针对碳酸盐沉积体系，国际上的系统研究始于 20 世纪 70 年代，近 20 年以来，在碳酸盐的来源、沉积环境（温度、水深、生物作用）、礁滩沉积模式等方面取得了快速进展（Tucker *et al.*, 2009；

Ma *et al.*, 2011; Moore *et al.*, 2013; James *et al.*, 2015)。而在中国西部, 发育多个大型叠合盆地, 这些盆地往往构造演化周期长, 沉积演化格局研究难度大, 对于这类沉积盆地中的碳酸盐岩油气勘探, 开展古地貌及其控制下的岩相古地理研究是其重要内容之一, 同时也是油气储集层预测研究的重点(刘军锸等, 2014; 贾艳雨等, 2023; 徐平生等, 2023)。杨帅等(2021)对四川盆地栖霞—茅口组的层序及岩相古地理开展研究, 提出构造—沉积格局对岩相古地理格局具有明显的控制作用, 浅水地貌成因的台地边缘内侧云质浅滩相带是有利的油气勘探区带。徐文礼等(2021)对川东地区下三叠统嘉陵江组开展了高频层序地层研究, 并编制了岩相古地理图件, 揭示了嘉陵江期的沉积演化过程, 指出台内浅滩是勘探重点。

近年来, 许多学者针对四川盆地石牛栏组沉积体系开展了大量的研究工作, 取得了不少新的成果认识。但受限于资料来源较为单一或研究范围的局限性, 对石牛栏组沉积格局认识存在一定的争议。部分学者认为, 四川盆地南部石牛栏组沉积期由南到北水体总体加深, 依次发育台地相、前缘斜坡以及陆棚相(郭英海等, 2004; 马东洲等, 2006; 王正和等, 2013; 王海军等, 2016; 朱志军和王治波, 2016); 也有学者提出, 石牛栏组沉积期, 川南地区为一向北倾斜的碳酸盐岩缓坡环境, 自南向北依次发育内缓坡、中缓坡及外缓坡相(王瑞华等, 2013; 王正和等, 2013; 周息息等, 2014); 同时, 也有学者认为, 川南地区南北两侧均发育碳酸盐岩台地或者礁滩—斜坡环境, 中部发育陆棚沉积(王鲲, 2016; 白壮壮等, 2023)。因此, 当前对于四川盆地石牛栏组沉积时期的古地理格局认识尚未取得统一, 石牛栏组沉积特征研究亟需深化。

古地貌格局是控制沉积相发育及演化的重要因素, 沉积环境与沉积期古地貌往往具有很好的对应关系(鲜本忠等, 2017; 钟寿康等, 2022)。前人研究中主要基于盆地南缘的志留系露头及少量的钻测井资料, 对盆缘区石牛栏组的沉积特征进行了揭示, 但受限于资料情况, 对石牛栏组沉积时盆缘至盆内整体的古地貌变化格局及其与沉积演化规律的联系缺少深入探讨。

针对川南地区石牛栏组, 充分结合研究区野外露头、大量的钻测井以及重点地区三维地震等宏观

资料和镜下微观分析测试资料开展综合研究, 分析石牛栏组详细的地层、古地貌及沉积特征, 揭示古地貌格局与沉积演化规律之间的联系, 希望能够为深化川南地区石牛栏组碳酸盐沉积环境认识及油气储集层预测提供一定借鉴。

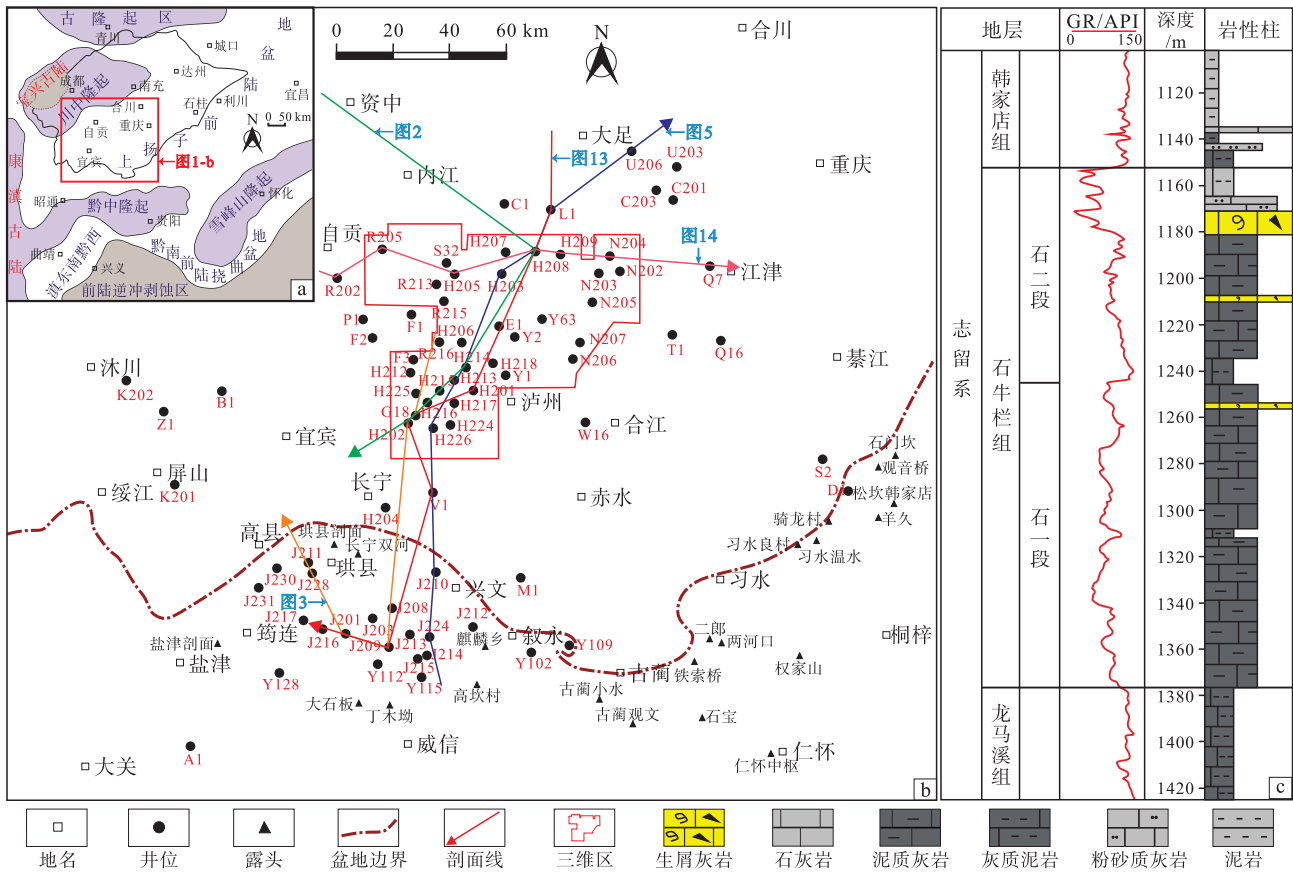
## 1 地质概况

四川盆地面积约  $26 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 是中国重要的含油气盆地之一, 位于扬子地块西缘, 经历了古生代—早中生代克拉通拗陷阶段以及晚三叠世—新生代晚期的前陆盆地阶段, 是典型的多旋回克拉通内盆地(陈世悦等, 2011; 何治亮等, 2023)。

四川盆地具有明显的菱形地貌边界, 周缘被高山围绕, 西为龙门山、邛崃山, 北有米仓山、大巴山, 东为齐耀山、大娄山, 南有峨眉山、大凉山等山脉。志留纪时期, 盆地位于扬子板块西北缘, 整体处于赤道附近低纬度地区的冈瓦纳大陆北缘, 处于强烈构造活动时期, 盆地周缘北部、南部、东部分别被川中隆起、黔中隆起、雪峰古陆所围限, 总体呈现出三隆夹一坳沉积格局(侯明才等, 2010; 戎嘉余等, 2012)(图 1-a)。研究区位于四川盆地南部, 西起沐川、绥江, 东接重庆、桐梓, 北邻资中、大足, 南倚威信、仁怀(图 1-b)。

四川盆地志留系为 1 套分布广泛的海相地层, 顶部遭受广泛侵蚀削截, 往往发育不全, 其上多为晚古生代地层所覆盖, 与上覆地层呈区域性不整合接触, 其下以奥陶系为主, 多为整合接触(李志明等, 1997; 郭英海等, 2004)。至中志留世, 盆地东南部雪峰古陆进一步隆升并向北西方向持续挤压, 四川盆地东部发育了 1 套小河坝组的海相三角洲碎屑岩沉积。同时, 盆地南部川中隆起、黔中隆起之间发育了 1 套石牛栏组碳酸盐沉积, 以生物碎屑灰岩为主, 石牛栏组、小河坝组在四川盆地为同时期不同沉积相的产物(孙自明等, 2021)。

川南地区石牛栏组(图 1-c)主要分布于川南、黔北地区, 大致以泸州地区为厚度中心, 向盆地边缘逐渐减薄, 沉积环境以碳酸盐岩台地为主。其中, 川南地区石牛栏组向上而上划为石一段和石二段, 石一段以顶部发育 1 套稳定的生物碎屑(礁)灰岩、颗粒灰岩为特征, 其上以石二段底部泥岩出现为界面标志, 石二段顶部主要岩性为泥质岩、砂屑灰岩、生屑灰岩。



a—四川盆地构造古地理简图；b—川南井位分布平面图，其中红框为三维区范围；c—石牛栏组地层柱状图（据白壮壮等，2023）

图 1 川南地区构造位置及地层柱状图

Fig. 1 Structure location and stratigraphic column of southern Sichuan Basin

## 2 地层格架与旋回对比

根据地震反射及测录井岩性、电性特征，开展了川南地区石牛栏组地层对比及旋回分析。在井—震标定反射剖面中，川南地区志留系总体表现为中—弱振幅反射特征，志留系龙马溪组及石牛栏组可

见向北部川中古隆起方向呈地层逐层上超模式。龙马溪组泥页岩岩性较为均一，整体为 1 套较弱振幅反射结构，石牛栏组底部与龙马溪组分界处以局部发育的强振幅反射为特征，代表了龙马溪组泥页岩向石牛栏组石灰岩的过渡，同样，石牛栏组与上部韩家店组之间为分布较广的强振幅反射同向轴，指

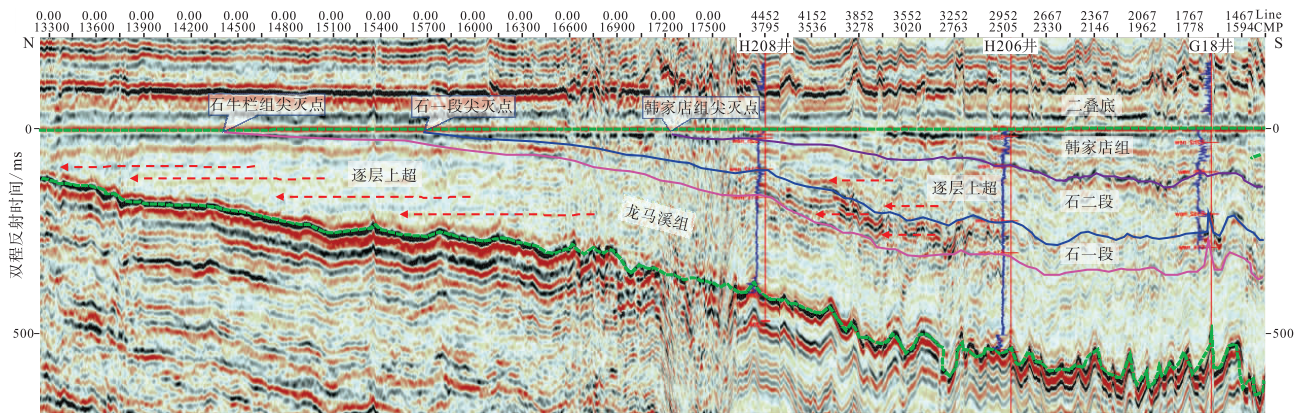


图 2 川南地区石牛栏组地震地层对比剖面

Fig. 2 Seismic stratigraphic correlation profile of the Shiniulan Formation in southern Sichuan Basin

示了石牛栏组石灰岩向韩家店组海相碎屑岩的岩性变化(图 2)。

在测井曲线上,石牛栏组顶、底界面测井响应特征清晰。石牛栏组底界面处测井曲线 GR 值出现显著负漂,代表了由泥页岩向泥质灰岩、生屑灰岩转换,石牛栏/韩家店组界面处 GR 值出现显著正漂,代表石牛栏组顶部泥质灰岩、砂屑灰岩、生屑灰岩或泥质粉砂岩向韩家店组粉砂质泥岩、泥岩的岩性转换(图 3)。可进一步基于测井、地震反射结构,将石牛栏组由底到顶分别划分为石牛栏一段(石一段)、石牛栏二段(石二段)。在地震反射剖面中,石一段、石二段分界面为局部强振幅波阻的顶界面,测井曲线上,部分井石一段、石二段界面处 GR 值显著正漂,代表了石一段顶部生屑灰岩、泥质灰岩向石二段底部灰质泥岩过渡的岩性转换面,该界面在前人研究中也视为区域性海侵面,指示了石一段上部高位体系域向石二段下部海侵体系域的转变,因此前人在四川盆地东部小河坝组的研究中,根据这一特征也将小一段、小二段分别划分为层序地层中的 2 个三级层序旋回(朱志军等,2010)。

川南地区石一段三级层序表现为由底到顶灰质含量呈现先减少后增大的特征。由北部至南部,石一段底部石灰岩段有增厚趋势,总体指示了龙马溪组沉积之后,区域相对海平面降低形成层序边界的过程,向上相对海平面逐渐升高,灰质含量减少,达到海侵最大后,相对海平面逐渐下降,发育石一段顶部高位体系域厚层段。随着海平面进一步下降,再次形成石一段三级层序底界面,表现为在浅水区,石一段底部发育石灰岩段,灰质含量较高,而在深水区,由于整体水深较大,相对海平面下降阶段沉积特征不明显,石灰岩段不发育,而以泥质沉积为主(J208 井、J209 井)。此后,相对海平面逐渐升高,灰质含量减少,达到海侵最大后,相对海平面逐渐下降,灰质增多,再次形成石二段顶部高位域石灰岩段(图 3)。

### 3 地层分布及古地貌格局

#### 3.1 地层分布特征

根据研究区钻揭石牛栏组的 100 余口井资料地层的精细划分对比,通过对每口井石一段、石二段

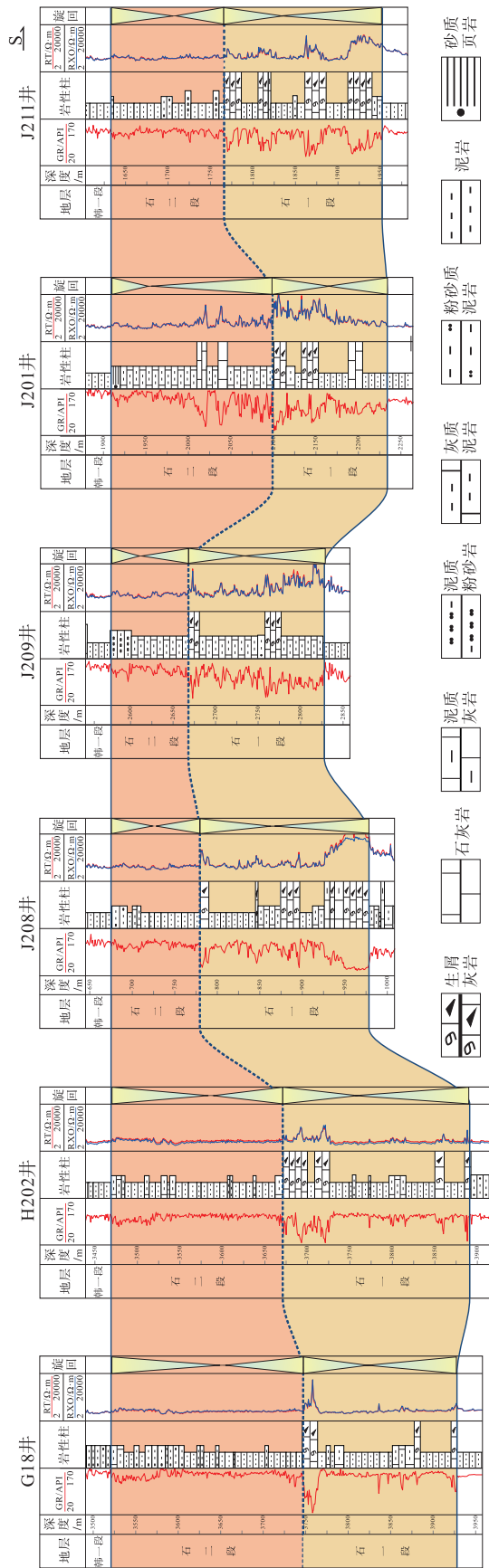


图 3 川南地区石牛栏组连井地层对比剖面  
Fig. 3 Well-connected section of the Shiniulan Formation in southern Sichuan Basin



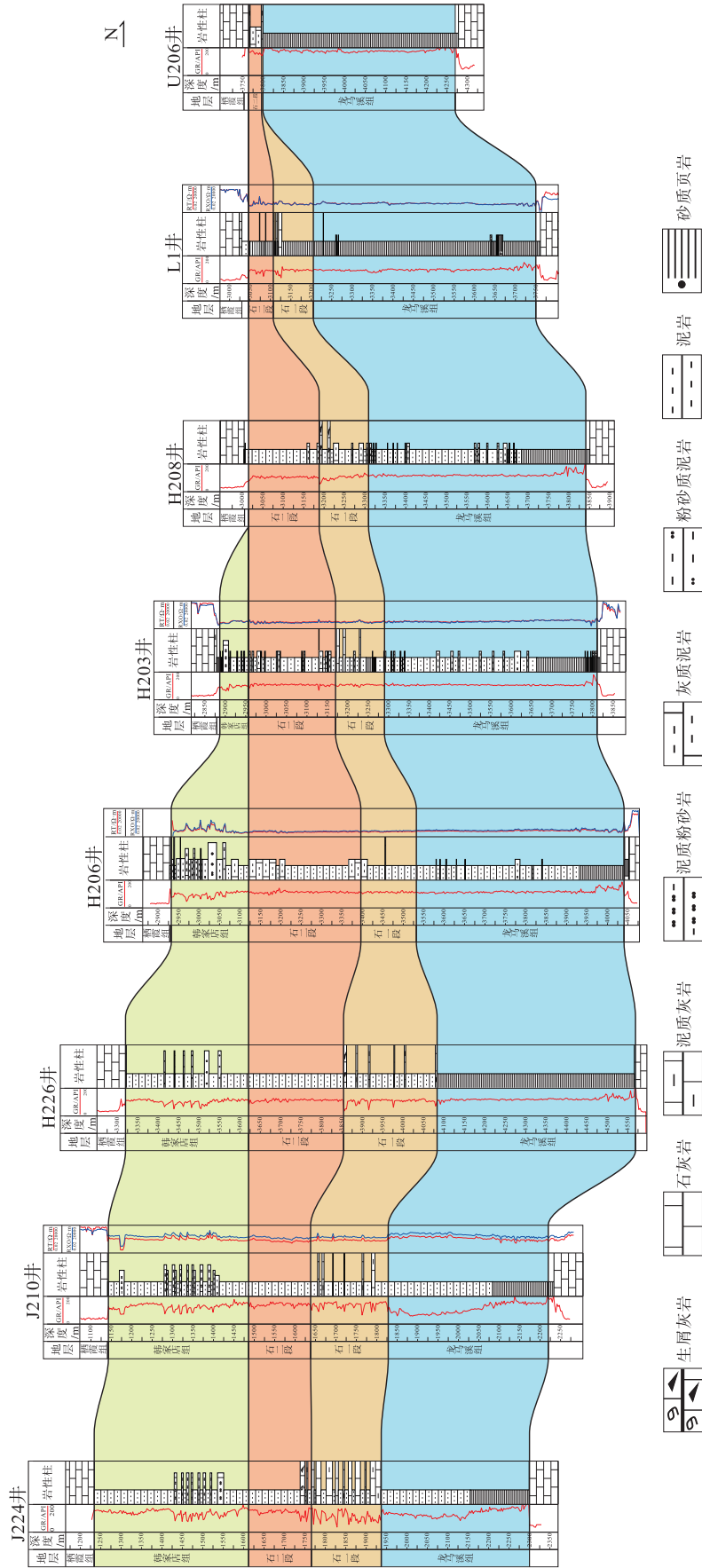


图 5 川南地区志留系龙马溪组—韩家店组连井地层对比剖面  
 Fig. 5 Well-connected profile from the Silurian Longmaxi Formation to Hanjiadian Formation in southern Sichuan Basin

地层厚度数据统计以及平面成图, 落实了川南地区石牛栏组各期地层厚度平面展布特征(图 4)。

总体上, 石一段及石二段地层分布特征具有明显的继承性, 均表现为中部厚, 南、北减薄, 呈北东—南西条带状展布。石一段、石二段地层整体厚度分布区间接近, 石一段厚为 0~260 m, 靠近北部川中隆起区的自贡、内江、大足以及靠近南部黔中隆起区的威信、习水等地厚度小于 100 m, 厚度高值区位于宜宾、泸州、合江、江津一带, 为 230~260 m。中部宜宾以东、长宁地区局部地层较薄, 为 170~230 m。石二段厚度介于 0~300 m 之间, 相比石一段整体略增厚, 厚度高值区沿研究区中部呈狭长带状分布, 宜宾及泸州以东地层存在局部减薄(图 4)。

### 3.2 古地貌格局

地层接触关系以及原始地层的沉积厚度能够很好地反映沉积期的古地貌格局特征。通过开展下、中志留统龙马溪组至韩家店组区域性的井—震地层对比以及地震地层的精细追踪和地貌刻画, 明确了石牛栏组沉积时期的古地貌格局特征。

通过井—震地层标定剖面可知, 川南地区龙马溪组—石牛栏组地层向北部川中隆起呈现逐层超覆模式, 指示了在龙马溪组沉积时期, 研究区北部川中水下古隆起便已经形成, 并对当时的沉积作用形成显著影响(图 2)。在石牛栏组沉积期, 相对于龙马溪组, 石牛栏组向北部川中隆起方向以及南部黔中隆起方向呈现显著的地层逐渐减薄(图 4; 图 5), 这一特征与地震剖面中的地层逐层上超尖灭相吻合, 表明在石牛栏组同沉积时期, 川中、黔中古隆起已开始显著活动并对川南地区的沉积地貌格局产生了明显控制作用(图 5)。

进一步开展三维区地震古地貌的精细刻画(图 6), 并结合地层厚度平面展布分析(图 4), 揭示了川南地区石牛栏组石一段及石二段沉积时期发育有 3 个不同的古地貌区带, 分别是环川中隆起的北部高带, 中部洼地以及环黔中隆起的南部高带, 且在中部洼地地区可见局部、小范围的多个古地貌高带存在(图 4; 图 6)。

## 4 沉积特征及展布

### 4.1 岩性分布特征

基于岩性—电性关系分析及单井统计, 落实了

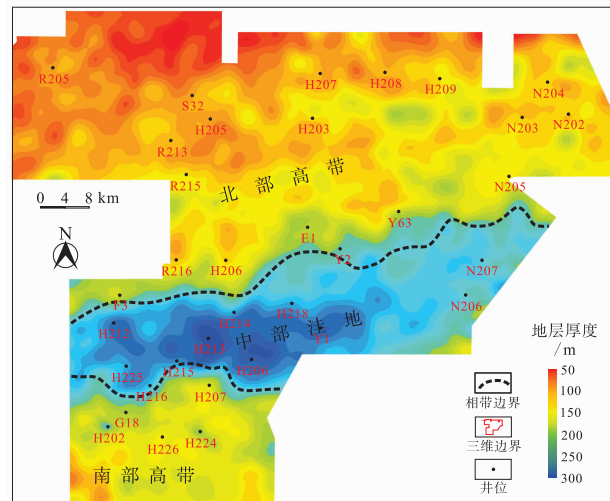


图 6 川南地区石牛栏组一段地震刻画古地貌

Fig. 6 Palaeogeomorphology of the Member 1 of Shiniulan Formation by seismic characterization in southern Sichuan Basin

石牛栏组不同时期石灰岩厚度的平面分布, 总体上可分为北部、中部及南部 3 个石灰岩发育区(图 7)。相对来说, 石一段石灰岩更加发育, 垂向上随着地层变新, 石灰岩含量逐渐减少, 碎屑岩厚度比例增多, 根据前文中连井剖面对比分析可知(图 3), 在部分井段中石一段的上部已出现泥质粉砂岩、粉砂质泥岩等碎屑岩沉积, 这和下一中志留统石牛栏组至韩家店组整体的岩性变化规律相一致。

石一段石灰岩厚度介于 0~80 m 之间, 南部石灰岩累计厚度更大, 筠连、珙县以南以及兴文等地石灰岩厚度可超过 60 m, 垂向上主要分布于石一段的底部, 岩性主要为 1 套厚层块状生物碎屑灰岩或生物礁灰岩, 其北部石灰岩厚度相对较薄, 主要厚度区间位于 20~40 m 之间, 中部相对来说石灰岩最不发育, 仅局部分布于 G18、Y1 等井区。石二段石灰岩整体不发育, 石灰岩分布范围减小。并且相对石一段而言, 石二段南部石灰岩的分布范围具有整体向黔中隆起方向南移的趋势(图 7)。

### 4.2 沉积体系类型及特征

#### 4.2.1 碳酸盐岩台地沉积体系

1) 局限台地: 发育于障壁岛后向陆一侧, 以比较平坦的海岸地带和浅水盆地为特征。主要分布于川南地区北带环川中古隆起的浅水高地貌区, 岩性主要以泥晶灰岩、云质灰岩、灰质白云岩及灰质





a—华蓥山石牛栏组珊瑚礁灰岩；b—华蓥山石牛栏组珊瑚横切面，虫管密集发育；c—宜宾兴文县石牛栏组生屑灰岩；d—降盛 2 井石牛栏组生屑灰岩（王海军等，2016），4001.76 m；e—宜宾兴文县石牛栏组生物礁灰岩；f—D1 井石牛栏组生物礁灰岩（白壮壮等，2023），1173 m；g—西门 1 井石牛栏组生物礁灰岩（王海军等，2016）；h—G18 井石牛栏组生屑灰岩，岩溶角砾及溶沟发育，3756.97 m

图 8 川南地区石牛栏组典型野外露头及岩心照片

Fig. 8 Typical outcrop and core photos of the Shiniulan Formation in southern Sichuan Basin

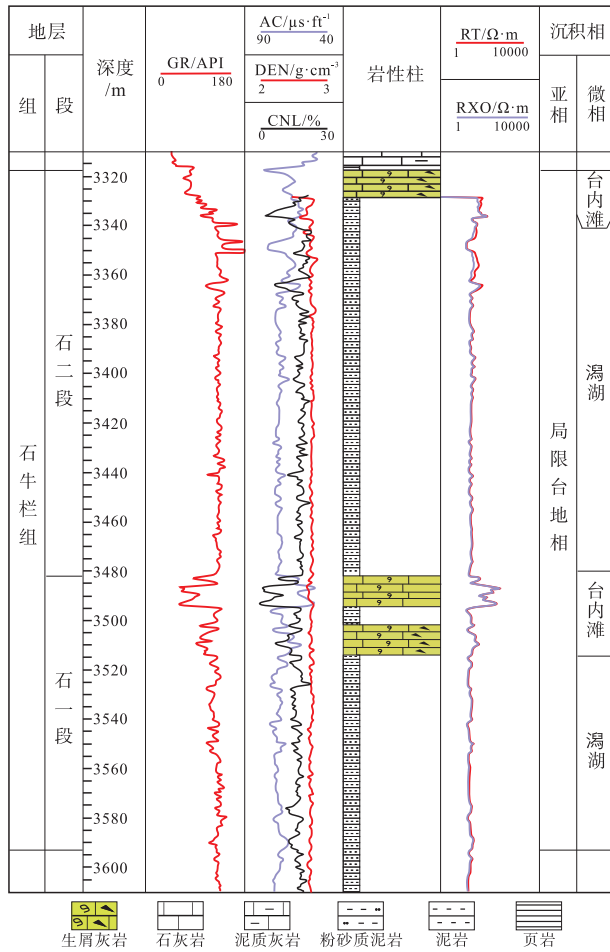


图 9 R205 井石牛栏组沉积相划分  
Fig. 9 Sedimentary facies division of the Shiniulan Formation of Well R205

泥页岩为主，夹中至薄层的生屑灰岩、生物礁灰岩，可进一步划分出潟湖、台内滩及台内生物礁亚相。潟湖亚相以灰色、深灰色中—厚层泥质灰岩、泥晶、粉晶灰岩为主，夹纹层状砂屑灰岩条带，发育水平层理，局部见波纹交错层理。台内生物礁亚相以灰色—深灰色生物礁灰岩、含生屑礁灰岩为主，以点礁形式发育，分布局限。在华蓥山野外露头生物礁灰岩中可见较为完整的珊瑚等造礁生物化石，单个珊瑚虫管长度约 10 cm，直径为 0.5 ~ 2 cm，呈集群式大量分布(图 8-a, 8-b)，局部可见腕足类、海百合茎化石，具弱白云化作用。台内滩岩性以灰色—深灰色生物碎屑灰岩为主，石灰岩厚度一般不超过 20 m (图 9)，生屑主要为珊瑚碎片(图 10)，镜下可见云质生屑灰岩，发育溶孔溶洞，岩溶充填物云化(图 10-a)。

2) 台地边缘浅滩：浅滩沉积岩性主要包括中

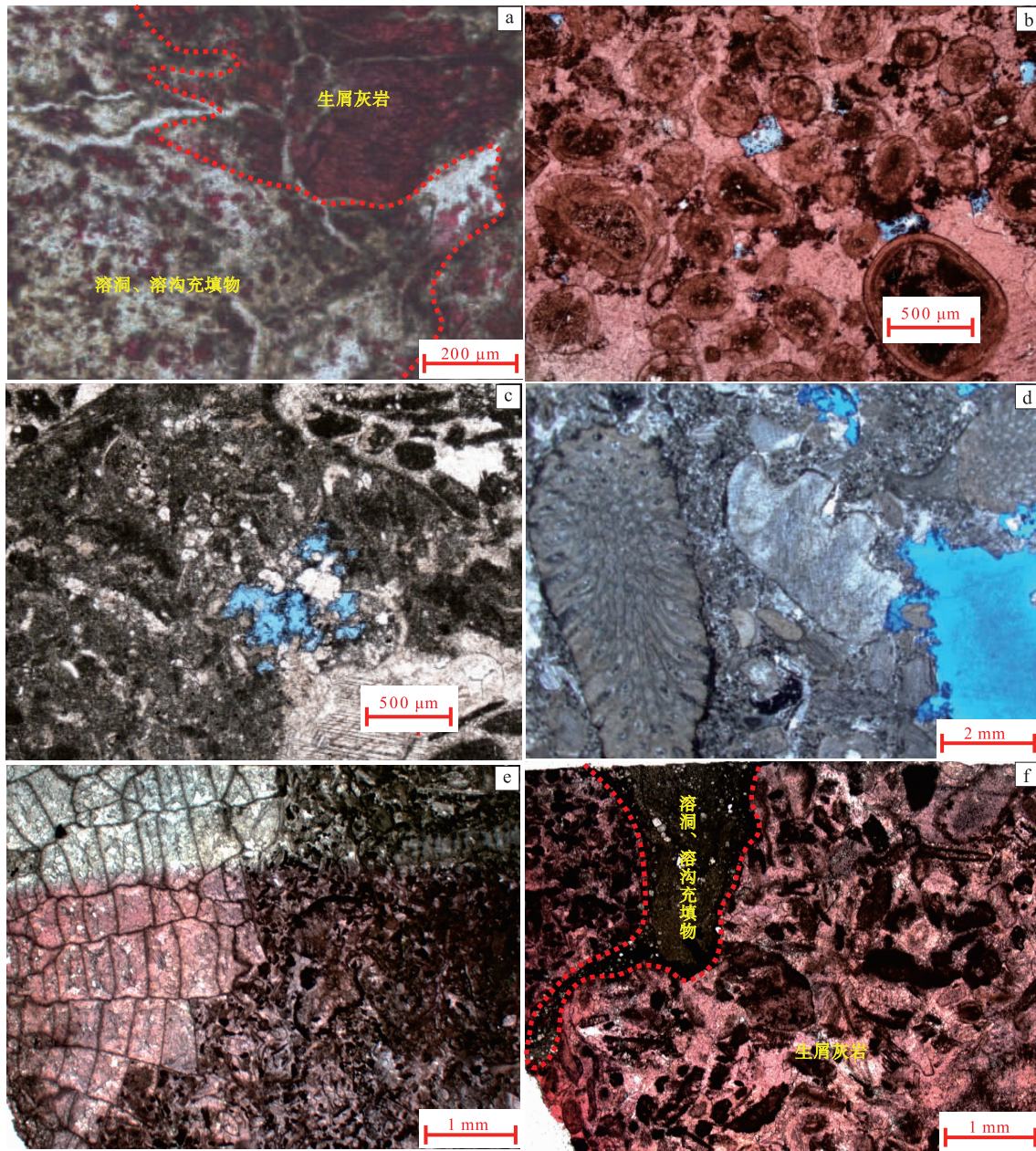
一厚层状亮晶砂屑灰岩、亮晶生屑灰岩(图 8-c, 8-d) 以及鲕粒灰岩，多与滩间泥质灰岩、灰质泥岩呈互层状，发育波痕及冲洗交错层理等，镜下可观察到生物碎屑(珊瑚碎片)呈杂乱排列以及亮晶灰岩中溶蚀孔洞发育(图 10-b, 10-c)。台地边缘浅滩主要分布于川南地区南部地貌高带，D1 井、西门 1 井以及兴文县、骑龙村等剖面均见较好的生屑滩发育，钻测井揭示浅滩单层沉积厚度较薄，一般不超过 4 m，横向分布不稳定(图 11)。

3) 台地边缘生物礁相：以研究区南部地貌高带分布最广，在长宁、兴文、叙永、习水以及綦江等地野外露头及南部西门 1 井、D1 井岩心中均可见发育(图 8-e, 8-f, 8-g)，平面上呈带状分布，垂向上主要分布于石一段下部。岩性以灰色—深灰色块状生物礁灰岩为主，造礁生物主要为珊瑚，次为苔藓虫及层孔虫，镜下可见溶蚀孔洞发育(图 10-d)，石灰岩中局部可见腕足类、海百合茎等化石碎片。相对北部地貌高带发育的台内点礁，南部高带地区发育的台地边缘生物礁灰岩累计厚度较大，但一般不超过 40 m (图 11)。

4) 开阔台地相：开阔台地主要分布于川南地区南部高带，岩性以发育薄—厚层含生屑微晶灰岩、生屑灰岩、泥质灰岩为主。在钻测井及野外剖面中，可见开阔台地相与礁滩沉积交替出现(图 11)。

#### 4.2.2 陆棚沉积体系

陆棚沉积可划分为浅水陆棚和深水陆棚，在川南地区主要发育浅水陆棚相，广泛分布于沿北东—南西方向狭长展布的中部洼地范围内。根据钻测井及岩心资料，研究区主要发育岩性以浅灰色、灰绿色泥岩、粉砂质泥岩为主的泥质浅水陆棚沉积，发育水平层理或块状构造，偶尔可见夹极薄层的灰质泥岩、石灰岩条带。该相带的局部地区，由于受到局部古地貌高带的影响，也可发育孤立的碳酸盐岩台地，形成生物碎屑灰岩，生屑类型包括藻类、介壳类、有孔虫类、珊瑚类，颗粒间多为亮晶胶结，并可见岩溶角砾及溶沟发育(图 8-h；图 10-e, 10-f)。扬子区在志留纪总体上是以浅海陆架为背景，早志留世龙马溪组沉积期，川南地区为深水陆棚所覆盖，发育龙马溪组暗色泥页岩，随着志留纪海平面持续下降(王海军等, 2016)以及隆起抬升和造礁生物繁盛，碳酸盐岩台地前端洼地区转为浅水泥质陆棚发育区。



a—R205 井石牛栏组云质灰岩，岩溶充填物云化，正交光；b—古蔺县石宝镇剖面，石牛栏组亮晶粉屑—鲕粒灰岩，见粒间溶孔，单偏光；c—习水良村剖面，石牛栏组亮晶砂屑灰岩，见粒内溶孔，单偏光；d—綦江骑龙村剖面，石牛栏组生物礁灰岩，见溶孔溶洞，单偏光；e—G18 井石牛栏组生屑灰岩，3757.29 m，正交偏光；f—G18 井石牛栏组生屑灰岩与岩溶充填物，3756.97 m，正交偏光

图 10 川南地区石牛栏组石灰岩典型镜下照片

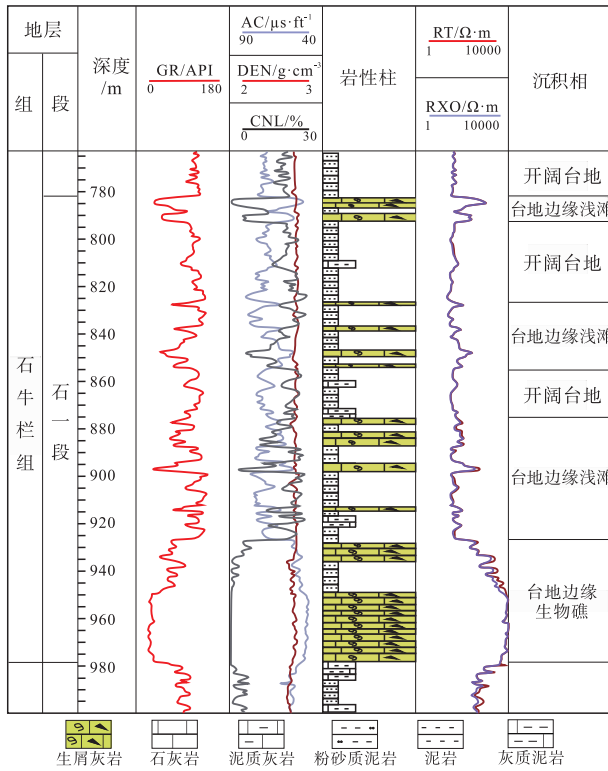
Fig. 10 Typical microscopic photos of limestone of the Shiniulan Formation in southern Sichuan Basin

### 4.3 沉积体系演化

通过地震资料属性刻画，落实了三维区碳酸盐岩礁滩体的平面分布特征。地震均方根振幅平面属性图中(图 12)，可见北部高带石牛栏组礁滩体以中—强振幅属性为特征，呈现孤立的“土豆状”形态，边缘不规则，与周围围潮坪相泥晶灰岩、灰质

泥岩呈突变接触，单个礁滩体面积一般介于 70 ~ 600 km<sup>2</sup> 之间。相对来说，中部洼地礁滩体总体不发育，仅局部分布，其平面均方根振幅属性相对更强，这可能与该区域礁滩体灰岩与围岩陆棚环境泥岩及灰质泥岩具有更大的岩性差异有关。

利用钻测井资料及露头资料标定，开展了石牛栏组剖面沉积相的对比分析。由南向北，川南地区



本部分缺少局限台地亚相、浅水陆棚相  
图 11 J208 井石牛栏组沉积相划分

Fig. 11 Sedimentary facies division of the Shiniulan Formation of Well J208

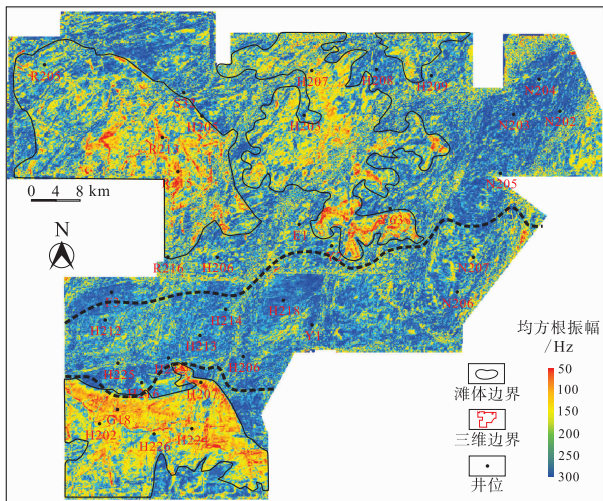


图 12 川南地区石牛栏组一段地震属性平面分布  
Fig. 12 Seismic attribute plane of the Member 1 of Shiniulan Formation in southern Sichuan Basin

主要发育开阔台地、台地边缘礁滩体、陆棚及局限台地、台内礁滩等沉积环境(图 13; 图 14)。平面上, 南部高带较北部高带碳酸盐岩礁滩体更加发育, 垂向上, 石一段相较石二段礁滩体更加富集

(图 15), 且自南向北, 礁滩体存在由底部向上部集中的趋势, 单个礁滩体厚度一般不超过 50 m, 因此在地震剖面中很难通过丘状、透镜状等典型地震反射响应结构加以识别, 往往表现出局部中强振幅反射, 向两侧衰减。

平面沉积相分布特征表明, 整体上, 石牛栏组碳酸盐岩沉积体系经历了龙马溪组之后由石一段的繁盛阶段到石二段逐渐消亡阶段(图 15)。这可能与志留纪四川盆地总体降低的海平面、强烈的构造隆升活动以及与此相关的物源供给增强有关。

#### 4.4 石牛栏组沉积演化模式

碳酸盐岩的沉积演化及优质储集层分布与古地貌及盆地构造存在密切联系, 古地貌高带往往是优质碳酸盐岩储集相带的发育部位(何文渊等, 2023; 刘圣乾等, 2023; 余义常等, 2023)。本次研究表明, 石牛栏组沉积期, 四川盆地南部发育北带(自贡—泸州—大足—线)、中带(宜宾—长宁—合江—线)、南带(盐津—兴文—习水—线)3 个主要的古地貌区, 其中北带及南带为 2 个古地貌高带、中带为台内洼地古地貌(图 4; 图 5; 图 6)。

综合本次研究(图 8; 图 9) 以及前人研究, 基于已有的钻井及露头资料揭示了南部高带石牛栏组发育大量的生物礁(珊瑚)及生屑滩沉积(郭英海等, 2004; 何利等, 2013; 王海军等, 2016; 白壮壮等, 2023), 指示了浅水、高能、动荡的碳酸盐沉积环境。北部高带以及中带台内洼地局部高带钻井揭示发育大量的生屑灰岩, 可见准同生期的岩溶及白云岩化作用, 环北部高带华蓥山露头揭示石牛栏组发育大量生物礁灰岩, 并且通过地震剖面解释及属性精细刻画, 揭示了石牛栏组向川中古隆起逐层上超地震地层模式以及环北带发育的多个碳酸盐岩滩体(图 12)。这些研究表明, 石牛栏组沉积期川南地区 3 个地貌区分异的古地貌格局对地层、沉积相具有显著的控制作用, 因此建立了研究区石牛栏组沉积演化模式(图 16), 强调了川南地区由南至北 3 个地貌单元分别发育开阔台地、台内洼地及局限台地沉积环境, 这一古地貌格局以及沉积演化特征是该时期盆地周缘构造运动及海平面变化的综合结果。

志留纪处于加里东运动时期, 受周缘古隆起构造活动影响, 盆地总体呈现三隆(川中隆起、黔

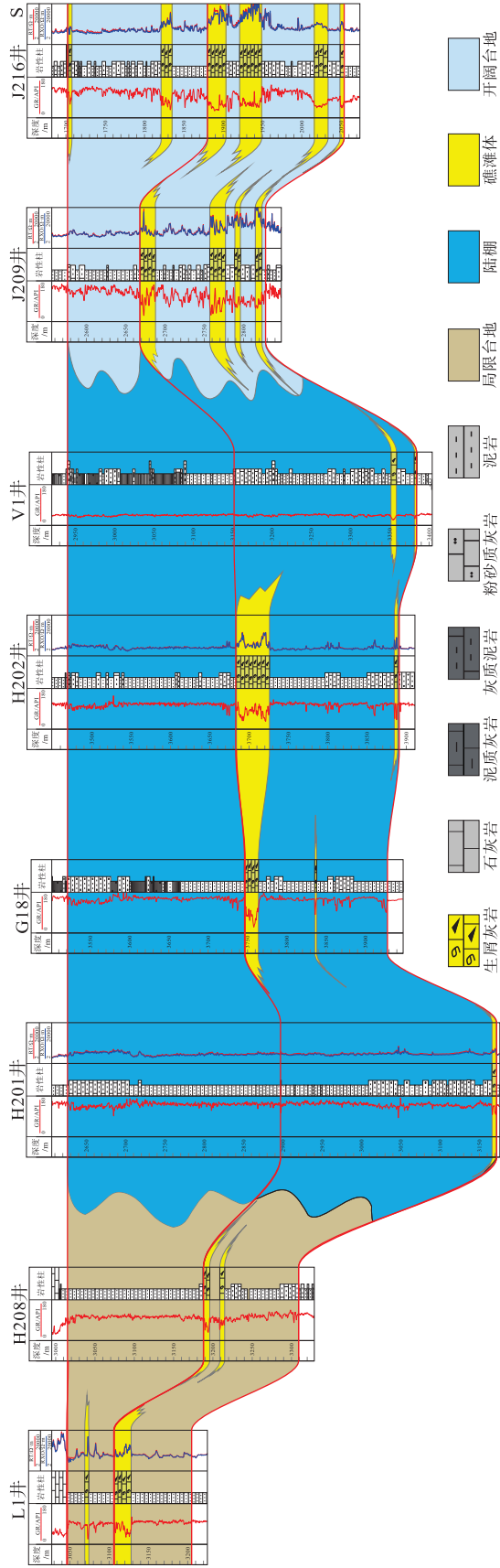


图 13 川南地区石牛栏组沉积相对比剖面(SN 向)  
 Fig. 13 Cross section showing well-to-well correlation of sedimentary facies of the Shimuiian Basin (North-south)

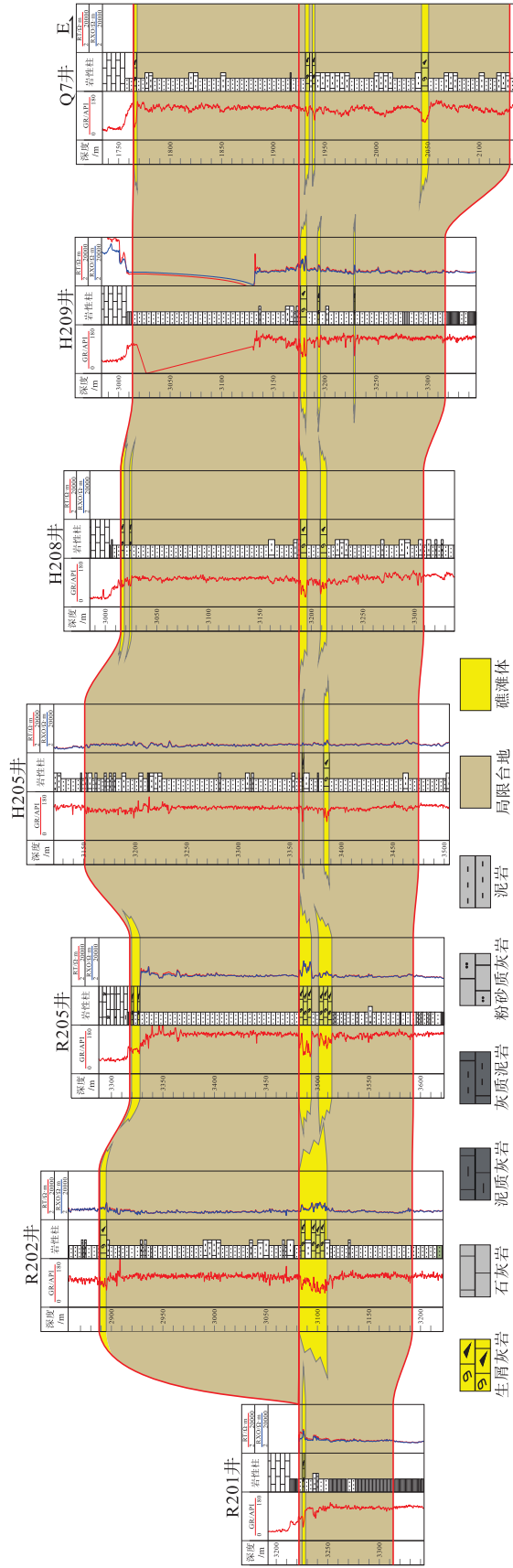
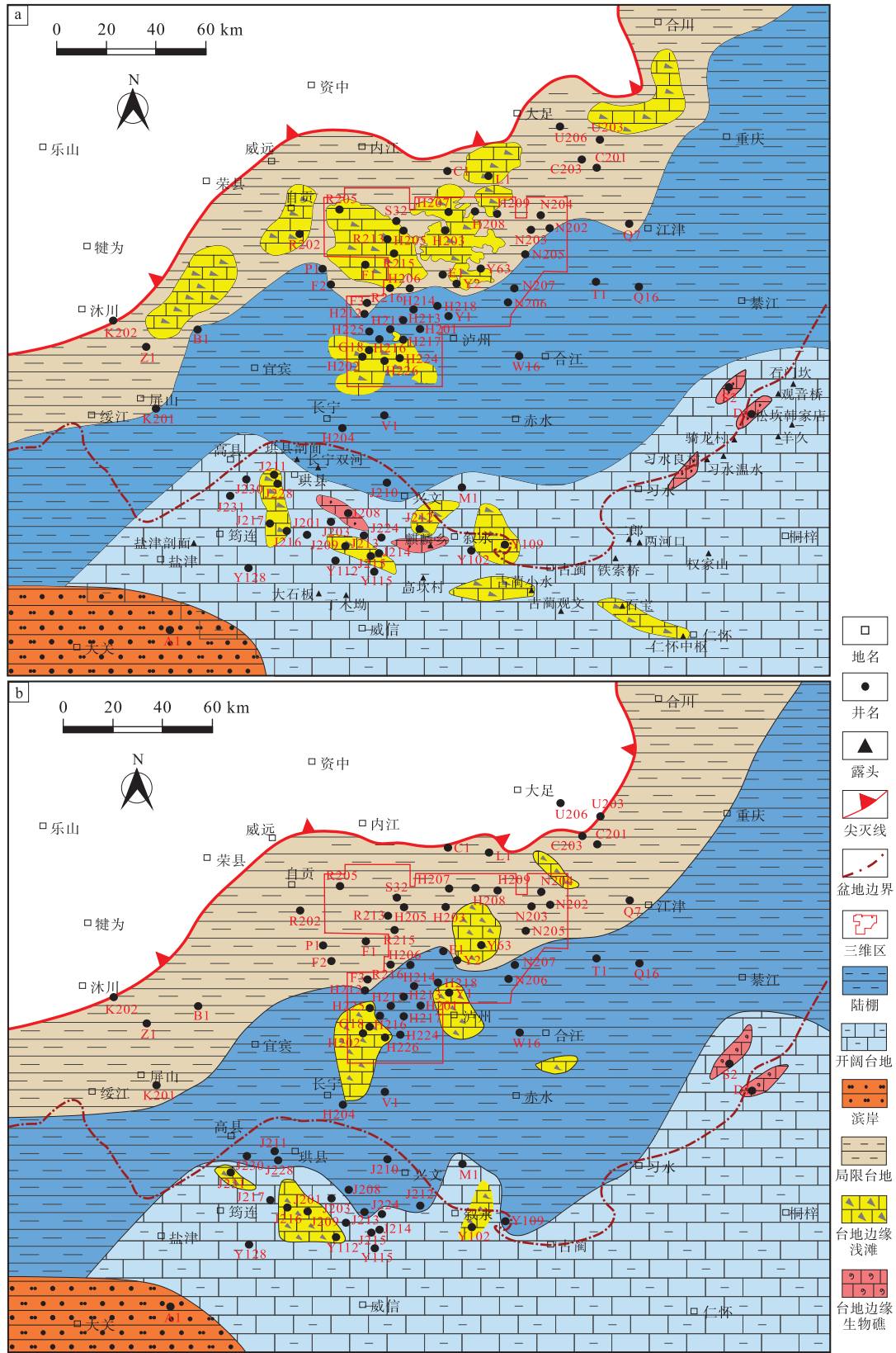


图 14 川南地区石牛栏组沉积相对比剖面(EW 向)  
 Fig. 14 Cross section showing well-to-well correlation of sedimentary facies of the Shimuiian Basin (East-west)



a—石一段; b—石二段

图 15 川南地区石牛栏组沉积相平面分布

Fig. 15 Sedimentary facies distribution of the Shiniulan Formation in southern Sichuan Basin

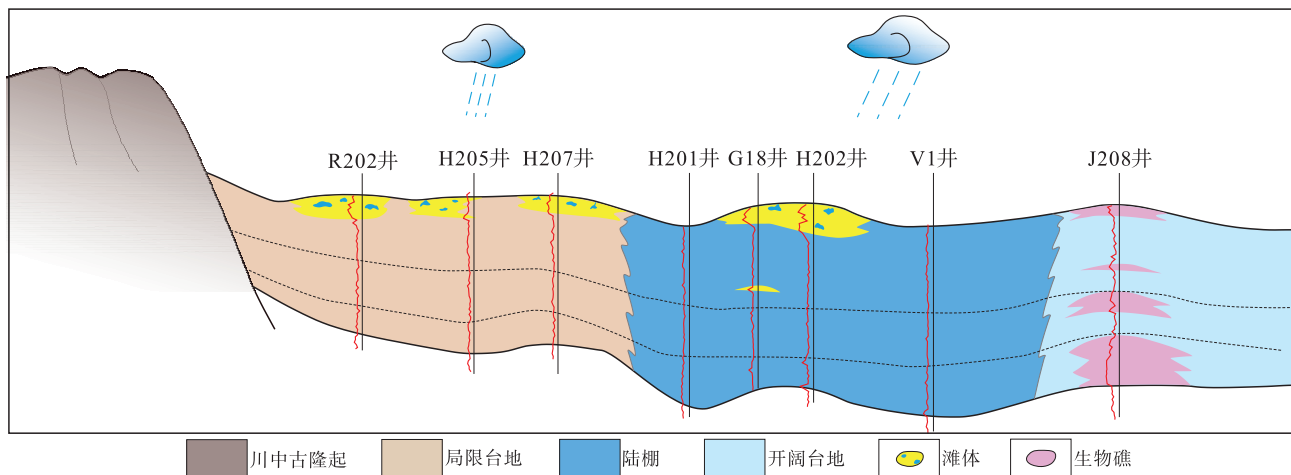


图 16 川南地区石牛栏组沉积演化模式

Fig. 16 Sedimentary evolution model of the Shiniulan Formation in southern Sichuan Basin

中隆起、雪峰古陆) 夹一坳构造格局 (何治亮等, 2023)。前人研究表明, 黔中隆起和川中隆起的形成时限为奥陶纪末—志留纪初的都匀运动 (侯明才等, 2010), 同时雪峰—江南隆起形成于早志留世石牛栏期 (何利等, 2013)。早志留世继承了晚奥陶世的构造格局, 川中隆起持续抬升扩展, 黔中隆起经历了先抬升后下降过程。这一构造演化过程, 对同时期的石牛栏组沉积具有重要的影响。在川南地区, 随着川中隆起及黔中隆起的持续隆升活动, 形成环绕隆起分布的构造高带, 而远离隆起的宜宾—长宁—合江等地区则表现为局部的洼地地貌特征, 伴随着黔中隆起后期沉降, 研究区石牛栏组后期南部碳酸盐岩台地有明显向南迁移趋势, 并随着中晚志留世川中隆起、雪峰古陆以及黔北地区的继续抬升和陆源碎屑供给的增强以及海平面持续下降 (戎嘉余等, 2012; 朱志军和陈洪德, 2012; 王恽等, 2013), 至石牛栏组沉积末期, 川南地区碳酸盐岩台地已逐渐消亡, 而主要发育 1 套以碎屑岩为主的韩家店组海相三角洲沉积。

## 5 结论

1) 川南地区石牛栏组沉积期古地貌特征表现为自南向北依次存在南部高带、中部洼地及北部高带 3 大地貌格局, 北部高带、中部洼地以及南部高带大致分别分布于自贡—泸州—大足、宜宾—长宁—合江以及盐津—兴文—习水一线。

2) 川南地区石牛栏组自南向北分别发育开阔

台地、台地边缘礁滩、台地边缘缓坡、陆棚、局限台地等沉积环境, 其中南部台地边缘礁滩以及北部局限台地台内礁滩是石牛栏组优质储集层发育的主要相带。

3) 石牛栏组沉积演化受早中志留世川南地区盆地古地貌格局及该时期构造活动、海平面变化的显著影响。早中志留世川中隆起、黔中隆起的隆升活动是川南地区石牛栏组 3 个地貌单元形成以及相应的碳酸盐岩台地、台内洼地发育的重要原因, 随着川中隆起的继续隆升及雪峰古陆向北西方向的持续挤压, 陆源供给显著增强, 并伴随海平面的整体下降, 石牛栏组碳酸盐岩台地逐渐消亡。

4) 石牛栏组沉积期环川中隆起以及黔中隆起的 2 个地貌高带是碳酸盐岩礁滩体等优质碳酸盐岩储集相带发育的有利地区, 可作为研究区石牛栏组规模储集层勘探开发的突破方向。

## 参考文献 (References)

- 白国平. 2006. 世界碳酸盐岩大油气田分布特征. 古地理学报, 8(2): 241-250. [Bai G P. 2006. Distribution patterns of giant carbonate fields in the world. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 8(2): 241-250]
- 白壮壮, 杨威, 李堃宇, 谢武仁, 马石玉, 计玉冰, 李文正, 王志宏, 武赛军, 黎荣, 苏亦晴. 2023. 川东南地区下志留统石牛栏组岩相古地理及生物礁滩发育特征. 天然气地球科学, 34(1): 35-50. [Bai Z Z, Yang W, Li K Y, Xie W R, Ma S Y, Ji Y B, Li W Z, Wang Z H, Wu S J, Li R, Su Y Q. 2023. Lithofacies palaeogeography and development characteristics of reef shoal in Lower Silurian Shiniulan Formation in southeastern Sichuan Basin. Natural Gas Geoscience, 34(1): 35-50]
- 陈世悦, 李聪, 张鹏飞, 王岳军. 2011. 江南—雪峰地区加里东期和印

- 支期不整合分布规律. 中国地质, 38(5): 1212-1219. [Chen S Y, Li C, Zhang P F, Wang Y J. 2011. The unconformable distribution of Caledonian and Indosinian strata in Jiangnan-Xuefeng area. China Geology, 38(5): 1212-1219]
- 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. 古地理学报, 6(1): 20-29. [Guo Y H, Li Z F, Li D H, Zhang T M, Wang Z C, Yu J F, Xi Y T. 2004. Lithofacies palaeogeography of the Early Silurian in Sichuan area. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 6(1): 20-29]
- 何利, 谭钦银, 王瑞华, 王正和, 程锦翔, 宋春彦. 2013. 川东南早志留世牛栏期沉积相、沉积模式及其演化. 矿物岩石, 33(4): 96-106. [He L, Tan Q Y, Wang R H, Wang Z H, Cheng J X, Song C Y. 2013. Sedimentary facies, sedimentary model and evolution of the Shiniulan Formation of Early Silurian in the Southeast Sichuan. Journal of Mineralogy and Petrology, 33(4): 96-106]
- 何文渊, 白雪峰, 蒙启安, 王显东, 田小彬, 鞠林波. 2023. 碳酸盐台内斜坡认识突破与重大发现: 以川中地区中二叠统茅口组二段气藏勘探为例. 中国石油勘探, 28(1): 59-70. [He W Y, Bai X F, Meng Q A, Wang X D, Tian X B, Ju L B. 2023. New understanding and significant discovery in the inner slope of carbonate platform: a case study of gas exploration in the second member of Maokou Formation in Central Sichuan Basin. China Petroleum Exploration, 28(1): 59-70]
- 何治亮, 金之钧, 李双建, 白国平, 吕雪雁, 郭金瑞, 高键, 殷进垠, 李英强, 郑定业. 2023. 特提斯演化控制下盆地原型、改造与油气差异富集: 基于波斯湾盆地与四川盆地的比较分析. 中国科学: 地球科学, 53(12): 2914-2936. [He Z L, Jin Z J, Li S J, Bai G P, Lü X Y, Guo J R, Gao J, Yin J Y, Li Y Q, Zheng D Y. 2023. Prototypes, modifications, and hydrocarbon enrichment variations in basins influenced by Tethyan evolution: a comparative analysis of the Persian Gulf Basin and the Sichuan Basin. Science China Earth Sciences, 53(12): 2914-2936]
- 侯明才, 陈洪德, 陈安清. 2010. 江南—雪峰隆起对川东南—黔南凹陷石牛栏期沉积古地理的制约. 成都理工大学学报(自然科学版), 37(4): 395-400. [Hou M C, Chen H D, Chen A Q. 2010. Constraints of the Jiangnan-Xuefeng upheaval to the depositional system and paleogeography distribution of southeast Sichuan-south Guizhou depression during Shiniulan Period. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 37(4): 395-400]
- 贾艳雨, 宿宇驰, 隋少强, 贾维明, 李宗峰, 杨志波, 王茜, 高飞, 季汉成, 鲍志东. 2023. 鲁西豫东地区奥陶纪岩相古地理特征及其演化. 古地理学报, 25(1): 133-147. [Jia Y Y, Su Y C, Sui S Q, Jia W M, Li Z F, Yang Z B, Wang X, Gao F, Ji H C, Bao Z D. 2023. Lithofacies palaeogeographic characteristics and evolution of the Ordovician in western Shandong-eastern Henan area. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 25(1): 133-147]
- 李志明, 龚淑云, 陈建强, 苏文博. 1997. 中国南方奥陶—志留纪沉积层序与构造运动的关系. 地球科学, 22(5): 83-87. [Li Z M, Gong S Y, Chen J Q, Su W B. 1997. Ordovician-Silurian depositional sequences and their relations with tectonic movement in South China. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 22(5): 83-87]
- 刘军铿, 简晓玲, 康波, 苏明, 杜学斌. 2014. 东营凹陷东营三角洲沙三段中亚段古地貌特征及其对沉积的控制. 油气地质与采收率, 21(1): 20-23, 112. [Liu J E, Jian X L, Kang B, Su M, Du X B. 2014. Paleogeomorphology of the middle part of 3rd member of Shahejie Formation and their effects on depositional systems, Dongying delta, Dongying depression. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 21(1): 20-23, 112]
- 刘圣乾, 何幼斌, 姜在兴, 罗进雄, 朱雪清, 朱青, 唐卫. 2023. 湖相碳酸盐岩礁滩体系沉积特征、主控因素及成因模式: 以东营凹陷西部沙四上亚段为例. 古地理学报, 25(4): 872-888. [Liu S Q, He Y B, Jiang Z X, Luo J X, Zhu X Q, Zhu Q, Tang W. 2023. Sedimentary characteristics, dominant factors and genetic model of lacustrine carbonate reef-shoal depositional system: a case study from the upper 4th Member of Shahejie Formation in western Dongying sag. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 25(4): 872-888]
- 马东洲, 陈洪德, 朱利东, 林良彪. 2006. 川南下志留统石牛栏组沉积体系与岩相古地理. 成都理工大学学报(自然科学版), 33(3): 228-232. [Ma D Z, Chen H D, Zhu L D, Lin L B. 2006. Depositional system and lithofacies and paleogeography of the Silurian Shiniulan Formation in the southern Sichuan Basin, China. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 33(3): 228-232]
- 马新华, 谢军, 雍锐, 朱逸青. 2020. 四川盆地南部龙马溪组页岩气储集层地质特征及高产控制因素. 石油勘探与开发, 47(5): 841-855. [Ma X H, Xie J, Yong R, Zhu Y Q. 2020. Geological characteristics and high production control factors of shale gas reservoirs in Silurian Longmaxi Formation, southern Sichuan Basin, SW China. Petroleum Exploration and Development, 47(5): 841-855]
- 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. 石油勘探与开发, 45(4): 561-574. [Ma Y S, Cai X Y, Zhao P R. 2018. China's shale gas exploration and development: understanding and practice. Petroleum Exploration and Development, 45(4): 561-574]
- 倪新锋, 沈安江, 韦东晓, 乔宇婷, 王莹. 2018. 碳酸盐岩沉积学研究热点与进展: AAPG 百年纪念暨 2017 年会及展览综述. 天然气地球科学, 29(5): 729-742. [Ni X F, Shen A J, Wei D X, Qiao Y T, Wang Y. 2018. Current hot topics and advances of carbonate sedimentology: AAPG 100 anniversary and 2017 annual meeting and exhibition. Natural Gas Geoscience, 29(5): 729-742]
- 戎嘉余, 王怿, 詹仁斌, 唐鹏, 黄冰, 吴荣昌, 王光旭, 李越, 邓小杰. 2012. 论桐梓上升: 志留纪埃隆晚期黔中古陆北扩的证据. 地层学杂志, 36(4): 679-691. [Rong J Y, Wang Y, Zhan R B, Tang P, Huang B, Wu R C, Wang G X, Li Y, Deng X J. 2012. On the Tongzi Uplift: evidence of northward expansion of Qianzhong Oldland during Aeronian, Llandovery, Silurian. Journal of Stratigraphy, 36(4): 679-691]
- 孙焕泉, 周德华, 蔡勋育, 王烽, 冯动军, 卢婷. 2020. 中国石化页岩气发展现状与趋势. 中国石油勘探, 25(2): 14-26. [Sun H Q, Zhou D H, Cai X Y, Wang F, Feng D J, Lu T. 2020. Progress and prospect of shale gas development of Sinopec. China Petroleum Exploration, 25(2): 14-26]
- 孙自明, 张荣强, 孙炜, 郝运轻, 卞昌蓉. 2021. 四川盆地东部海相下组合油气勘探领域与有利勘探方向. 现代地质, 35(3): 798-806. [Sun Z M, Zhang R Q, Sun W, Hao Y Q, Bian C R. 2021. Petroleum exploration domains and favorable directions of the Lower marine assemblage in eastern Sichuan Basin. Geoscience, 35(3): 798-806]
- 王海军, 孟宪武, 梁子锐, 李兴平. 2016. 川东南志留系石牛栏组生物礁特征与勘探方向. 中国石油勘探, 21(5): 33-41. [Wang H J, Meng X W, Liang Z R, Li X P. 2016. Organic Reef Characteristics

- and Exploration Orientation of Silurian Shiniulan Formation, South-eastern Sichuan Basin. *China Petroleum Exploration*, 21(5): 33-41]
- 王鲲. 2016. 川东南地区志留系石牛栏组沉积相与成岩作用研究. 成都理工大学硕士学位论文. [Wang K. 2016. Facies and diagenesis of Shiniulan Formation in southeast area of Sichuan Basin. Master's dissertation of Chengdu University of Technology]
- 王瑞华, 谭钦银, 付建元, 程锦翔, 王正和, 何利, 杨桂花, 杨贵来. 2013. 川东南志留系石牛栏组生物礁沉积特征. 沉积与特提斯地质, 33(2): 10-16. [Wang R H, Tan Q Y, Fu J Y, Chen J X, Wang Z H, He L, Yang G H, Yang G L. 2013. Sedimentary characteristics of the Silurian organic reefs from the Shiniulan Formation in southeastern Sichuan. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 33(2): 10-16]
- 王烽, 戎嘉余, 唐鹏, 吴荣昌. 2013. 志留纪早期上扬子海域南部桐梓上升的新证据. 地层学杂志, 37(2): 129-138. [Wang Y, Rong J Y, Tang P, Wu R C. 2013. New evidence of Early Silurian Tongzi Uplift from southern Upper Yangtze Sea. *Journal of Stratigraphy*, 37(2): 129-138]
- 王正和, 谭钦银, 何利, 程锦翔, 王瑞华. 2013. 川东南—黔北志留系石牛栏组沉积与层序地层. 石油与天然气地质, 34(4): 499-507. [Wang Z H, Tan Q Y, He L, Chen J X, Wang R H. 2013. Deposition and sequence stratigraphy of the Silurian Shiniulan Formation in Southeastern Sichuan-northern Guizhou Province. *Oil & Gas Geology*, 34(4): 499-507]
- 鲜本忠, 王震, 马立驰, 晁储志, 蒲强, 景安语, 王俊辉. 2017. 沉积区—剥蚀区古地貌一体化恢复及古水系研究: 以渤海湾盆地辽东地区馆陶组为例. 地球科学, 42(11): 1922-1935. [Xian B Z, Wang Z, Ma L C, Chao C Z, Pu Q, Jiang A Y, Wang J H. 2017. Paleao-drainage system and integrated paleo-geomorphology restoration in depositional and erosional areas; Guantao Formation in East Liaodong Area, Bohai Bay Basin, China. *Earth Science*, 42(11): 1922-1935]
- 徐平生, 唐松, 孙超国, 梁家驹, 李天军, 师晴. 2023. 川中高石梯—磨溪地区中二叠统茅口组岩溶发育特征与岩溶古地貌恢复. 天然气勘探与开发, 46(4): 35-46. [Xu P S, Tang S, Sun C G, Liang J J, Li T J, Shi Q. 2023. Development characteristics and paleo-geomorphology restoration of karsts in Middle Permian Maokou Formation, Gaoshiti-Moxi area, central Sichuan Basin. *Natural Gas Exploration and Development*, 46(4): 35-46]
- 徐文礼, 文华国, 刘均, 马智超, 孙权威, 蔡家兰, 陈守春, 韩建, 蒋欢, 荣浩然. 2021. 川东下三叠统嘉陵江组层序—岩相古地理特征. 沉积学报, 39(6): 1478-1490. [Xu W L, Wen H G, Liu J, Ma Z C, Sun Q W, Cai J L, Chen S C, Han J, Jiang H, Rong H R. 2021. Sequence-lithofacies paleogeographic characteristics of Lower Triassic Jialingjiang Formation in eastern Sichuan Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 39(6): 1478-1490]
- 杨帅, 陈安清, 张玺华, 李乾, 徐胜林, 陈聪, 孙诗, 李富祥, 罗倩, 文龙, 陈洪德. 2021. 四川盆地二叠纪栖霞—茅口期古地理格局转换及勘探启示. 沉积学报, 39(6): 1466-1477. [Yang S, Chen A Q, Zhang X H, Li Q, Xu S L, Chen C, Sun S, Li F X, Luo Q, Wen L, Chen H D. 2021. Paleogeographic transition of the Permian Chihshia-Maokou Period in the Sichuan Basin and indications for oil-gas exploration. *Acta Sedimentologica Sinica*, 39(6): 1466-1477]
- 余义常, 沈博珩, 李知为, 李峰峰, 郭睿, 宋世琦. 2023. 古地貌对生物碎屑灰岩沉积成岩的控制作用. 地质评论, 69(S1): 5-8. [Yu Y C, Shen B H, Li Z W, Li F F, Guo R, Song S Q. 2023. Controlling effects of paleogeomorphology on sedimentary and diagenetic characteristics of bioclastic limestone. *Geological Review*, 69(S1): 5-8]
- 张宁宁, 何登发, 孙衍鹏, 李浩武. 2014. 全球碳酸盐岩大油气田分布特征及其控制因素. 中国石油勘探, 19(6): 54-65. [Zhang N N, He D F, Sun Y P, Li H W. 2014. Distribution patterns and controlling factors of giant carbonate rock oil and gas fields worldwide. *China Petroleum Exploration*, 19(6): 54-65]
- 钟寿康, 谭秀成, 胡广, 聂万才, 杨梦颖, 张道锋, 郑剑锋, 许杰, 董国栋, 肖笛, 卢子兴. 2022. 古地理格局对膏盐岩—碳酸盐岩共生体系沉积分异的控制: 以鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马家沟组五段6亚段为例. 石油勘探与开发, 49(4): 728-740. [Zhong S K, Tan X C, Hu G, Nie W C, Yang M Y, Zhang D F, Zhen J F, Xu J, Dong G D, Xiao D, Lu Z X. 2022. Control of paleogeographic pattern on sedimentary differentiation of evaporite-carbonate symbiotic system: a case study of the sixth sub-member of Ordovician Majiagou Formation M5 Member in central-eastern Ordos Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 49(4): 728-740]
- 周恩恩, 牟传龙, 许效松, 葛祥英, 梁薇. 2014. 华南中上扬子早志留世古地理与生储盖层分布. 石油勘探与开发, 41(5): 623-632. [Zhou K K, Mou C L, Xu X S, Ge X Y, Liang W. 2014. Early Silurian paleogeography and source-reservoir-cap rocks of the Middle-Upper Yangtze region in South China. *Petroleum Exploration and Development*, 41(5): 623-632]
- 朱志军, 陈洪德, 林良彪, 侯明才, 陈安清, 钟怡江. 2010. 黔北—川东南志留系层序格架下的沉积体系演化特征及有利区带预测. 沉积学报, 28(2): 243-253. [Zhu Z J, Chen H D, Lin L B, Hou M C, Chen A Q, Zhong Y J. 2010. Depositional system evolution characteristics in the framework of sequence of Silurian and prediction of favorable zones in the Northern Guizhou-Southeastern Sichuan. *Acta Sedimentologica Sinica*, 28(2): 243-253]
- 朱志军, 陈洪德. 2012. 川东南地区志留系小河坝组砂岩特征及物源分析. 吉林大学学报(地球科学版), 42(6): 1590-1600. [Zhu L J, Chen H D. 2012. Sandstone characteristics and provenance analysis of the sandstone in Silurian Xiaoheba Formation in southeastern Sichuan Province, China. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42(6): 1590-1600]
- 朱志军, 张治波. 2016. 川东—鄂西志留系层序格架下沉积体系演化特征及有利区带预测. 科学技术与工程, 16(11): 13-21. [Zhu Z J, Zhang Z B. 2016. Depositional system evolution characteristic in the framework of sequences of silurian and prediction of favorable zones in eastern Sichuan-Western Hubei. *Science Technology and Engineering*, 16(11): 13-21]
- James N P, Brian J. 2015. *Origin of Carbonate Sedimentary Rocks*. John Wiley & Sons.
- Ma Y S, Cai X Y, Zhao P R. 2011. The research status and advances in porosity evolution and diagenesis of deep carbonate reservoir. *Earth Science Frontiers*, 18(4): 181-192.
- Moore C H, William J W. 2013. *Carbonate reservoirs: porosity and diagenesis in a sequence stratigraphic framework*. Newnes.
- Tucker M E, Wright V P. 2009. *Carbonate Sedimentology*. John Wiley & Sons.

(责任编辑 王绍华; 英文审校 龚承林)