

川东地区中二叠世茅口组台-槽分异演化及常规-非常规天然气勘探有利区新发现

郭杰^{1,2,3}, 肖笛^{1,2,3}, 罗冰⁴, 张本健⁴, 陈骁⁴, 张玺华⁴, 李明隆^{1,2,3}, 谭秀成^{1,2,3}

[1. 油气藏地质及开发工程全国重点实验室(西南石油大学), 四川 成都 610500; 2. 国家能源碳酸盐岩油气重点实验室研究分室(西南石油大学), 四川 成都 610500; 3. 四川省天然气地质重点实验室(西南石油大学), 四川 成都 610500; 4. 中国石油西南油气田公司勘探开发研究院, 四川 成都 610051]

摘要:四川盆地二叠纪裂陷演化过程、沉积充填规律不清,制约了油气勘探。基于露头、最新钻测井和地震资料,划分了川东地区二叠系茅口组层序,研究了地层沉积充填过程。研究表明:裂陷活动从中二叠世早-中期开始,茅(茅口组)一段沉积晚期开始进入初始裂陷期;茅二段沉积早期15#和16#基底断裂活化明显加剧,受南北向拉张应力的影响,研究区变为“南台地、北裂陷”沉积地貌特征;茅二段沉积晚期以后构造活动进一步加强,研究区进入裂陷持续发育期。多期构造-沉积分异过程很可能受峨眉山大火成岩省幕式活动影响,形成多期、多个坡折带。石柱、成20井区和张12井区的孤峰段为碳酸盐岩台地内相对低洼区域沉积,内部富有机质,高能滩区与周缘低洼区域孤峰段烃源岩形成良好的源-储配置,有望形成规模勘探区。成23井—忠县台缘浅滩带是天然气有利勘探区。

关键词:峨眉山大火成岩省;裂陷演化;层序地层;天然气;茅口组;四川盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Platform-trough differential evolution and recent findings on conventional and unconventional natural gas play fairways in the Middle Permian Maokou Formation, eastern Sichuan Basin

GUO Jie^{1,2,3}, XIAO Di^{1,2,3}, LUO Bing⁴, ZHANG Benjian⁴, CHEN Xiao⁴, ZHANG Xihua⁴,
LI Minglong^{1,2,3}, TAN Xiucheng^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China;
2. Research Branch of State Energy Key Laboratory of Carbonate Oil and Gas, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China;
3. Sichuan Provincial Key Laboratory of Natural Gas Geology, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China;
4. Research Institute of Exploration and Development, Southwest Oil & Gasfield Company, PetroChina, Chengdu, Sichuan 610051, China)

Abstract: The unclear understanding of the Permian rifting evolution and sedimentary filling patterns in the Sichuan Basin has hindered hydrocarbon exploration in this region. Based on outcrop observations and the latest drilling, logging, and seismic data, we determine the sequences in the Maokou Formation within the eastern Sichuan Basin and investigate the formation filling process from deposition. The results indicate that rifting in the eastern Sichuan Basin began in the early to middle Middle Permian, as manifested by the initial rifting stage during the late depositional stage of the 1st member of the Maokou Formation (also referred to as the Mao 1 Member), and the significantly intensified activation of Nos. 15 and 16 basement faults during the early depositional stage of the Mao 2 Member. In response to the tensile stress in the N-S direction, the sedimentary landscapes of study area are transformed as characterized by southern platforms and northern rifts. Following the late depositional stage of the Mao 2 Member, the tectonic activity got further intensified in the study area, evolving into a period of continuous rifting development. This multi-stage tectonic and sedimentary differentiation is likely

收稿日期:2024-09-04;修回日期:2025-01-07。

第一作者简介:郭杰(1999—),男,硕士研究生,沉积学。E-mail: 19938294146@163.com。

通信作者简介:肖笛(1989—),博士、副研究员,碳酸盐岩油气地质。E-mail: super_xd_mm@126.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(42172166);四川省自然科学基金项目(2025NSFJQ0005);中国石油天然气股份有限公司上游领域基础性前瞻性项目(2021DJ0501);中国石油-西南石油大学创新联合体科技合作项目(2020CX010300)。

influenced by the episodic activities of the Emeishan large igneous province (ELIP), leading to the formation of multi-stage slope break zones. The Gufeng Member of the Maokou Formation in the Shizhu area, as well as the Cheng-20 and Zhang-12 well blocks, represents organic matter-rich deposits formed in low-lying areas of the carbonate platform. Meanwhile, the reservoirs of the high-energy shoal facies and the source rocks of the Gufeng Member in the low-lying areas create a favorable source rock-reservoir configuration. All these establish the areas as potential large-scale exploration region. Furthermore, the platform-margin shoal zone in well Cheng-23—Zhongxian County is identified as a natural gas play fairway.

Key words: Emeishan large igneous province (ELIP), rift evolution, sequence stratigraphy, natural gas, Maokou Formation, Sichuan Basin

引用格式:郭杰,肖笛,罗冰,等. 川东地区中二叠世茅口组台-槽分异演化及常规-非常规天然气勘探有利区新发现[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(1): 192–210. DOI: 10. 11743/ogg20250114.

GUO Jie, XIAO Di, LUO Bing, et al. Platform-trough differential evolution and recent findings on conventional and unconventional natural gas play fairways in the Middle Permian Maokou Formation, eastern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(1): 192–210. DOI: 10. 11743/ogg20250114.

位于上扬子地块的四川盆地以其丰富的天然气储量而闻名,已发现的大型气田几乎均与强烈构造-沉积分异背景下的台-槽模式有关,且分布在裂陷槽周缘^[1],其中以安岳与普光特大气田最具代表性^[2–3]。近年来,越来越多证据表明,中二叠统茅口组也发育类似特征,具有形成大型气藏的潜力^[4];与此同时,从四川盆地二叠纪裂陷演化角度出发,过去认为晚二叠世长兴组沉积期是裂陷海槽发育成形阶段^[5],然而大量资料揭示了中二叠世茅口组沉积期裂陷沉降规模及范围大于晚二叠世长兴组沉积期^[6],可能意味着茅口组沉积期是快速伸展拉张的关键阶段,但目前针对茅口组沉积期裂陷的演化过程和驱动机制尚不清楚,很大程度上制约了天然气分布预测。

早期研究认为,川东地区茅口组沉积期存在古隆起,大规模的侵蚀作用导致茅口组具有由南向北剥蚀强度逐渐增大的特征,导致地层缺失^[7–11]。随着研究深入,发现川东地区具有西南高、东北低的古地貌特征,川东北地区地层减薄的主要因素可能为欠补偿沉积^[12]。近年来随着茅口组沉积期古裂陷槽与孤峰段的发现^[13],开始认为构造-沉积分异引起的沉降可能才是引发川东北地区地层减薄的主控因素^[14],而非前人所说的抬升剥蚀作用。更有意义的是,近期还发现在茅口组沉积期,川东地区可能存在与峨眉山大火成岩省(ELIP)有关的火山-岩浆活动,且可能影响了区域构造-沉积分异过程^[15–16]。因此,川东地区成为探究茅口组沉积期裂陷演化的良好场所。与此同时,川东地区茅口组是目前增储上产的重要层系^[17],在常规和非常规领域均获得高产工业气流^[18–19],展现出巨大的油气勘探前景。

鉴于此,本文基于川东地区茅口组丰富的新、老钻井资料及高精度露头自然伽马测井值,开展露头-钻井

层序界面识别和层序对比,分析等时层序格架充填过程,明确裂陷及相关“槽-台”时空演化,探讨可能的驱动机制,以期为川东地区茅口组常规-非常规油气勘探提供理论依据。

1 区域地质概况

中二叠世,四川盆地所属的华南板块位于赤道附近^[20],被古特提斯洋和泛大洋包围。在古特提斯洋俯冲消减的背景之下,华南板块受到金沙江-哀牢山洋、泛大洋俯冲及勉略洋扩张的影响,整体处于被动大陆边缘构造环境,板块内伸展作用明显。研究区属于川东高陡褶皱带区域,主要发育多条NE向和NW向深大断裂^[21–22],总体上表现为NW向的15#断层和16#断层切割NE向断层,并在开县、七里及华蓥山地区发育大量与ELIP相关的玄武岩^[14–15,23](图1)。

川东地区二叠系自下而上依次沉积梁山组、栖霞组、茅口组、龙潭组及长兴组。泥盆纪末期发生的柳江运动和石炭纪的云南运动使地层抬升暴露,在经过长期的剥蚀作用后造成了不同层位的缺失^[24–26],仅在局部地区残留中石炭统黄龙组碳酸盐岩^[27]。石炭纪末期随着冈瓦纳冰川融化^[28],海平面逐渐上升,在川东地区沉积栖霞组碳酸盐岩。栖霞组沉积末期,由于海平面相对下降,沉积区大规模暴露,遭受大气淡水溶蚀,从而在栖霞组顶部形成区域性不整合面^[29]。茅口组沉积早期,大规模海侵使得茅口组一段(茅一段)形成一套由灰岩和泥灰岩组成的韵律状灰岩(也称瘤状灰岩)^[30–31],往上逐渐过渡为灰色泥晶灰岩、泥晶生屑灰岩、生屑泥晶灰岩和亮晶生屑灰岩,局部地区发生不同程度白云岩化;茅口组沉积中-晚期,在ELIP玄武岩

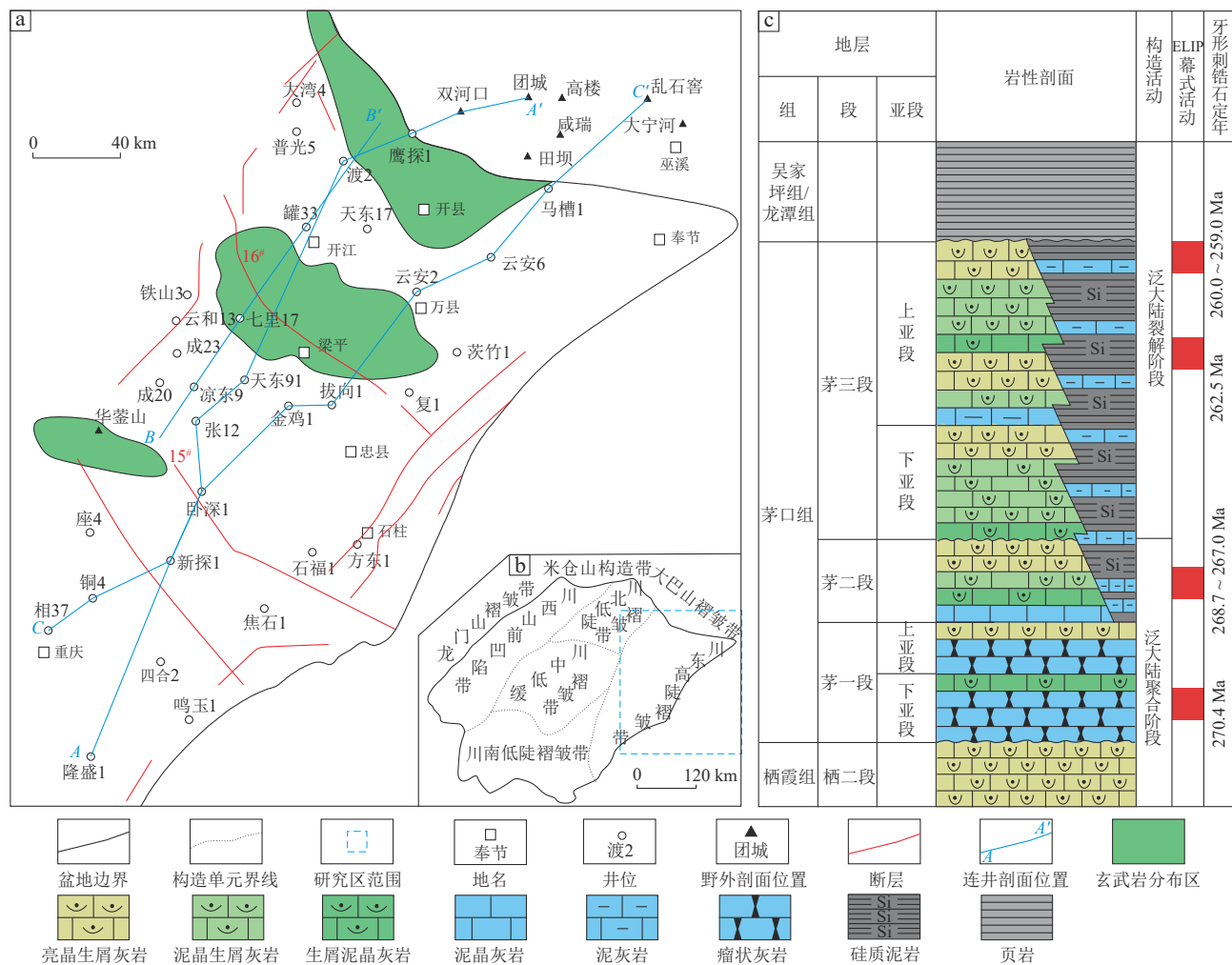


图1 川东地区构造位置及地层综合柱状图

Fig. 1 Structural location and synthetic stratigraphic column of the eastern Sichuan Basin

a. 玄武岩分布位置(据文献[37]修改); b. 研究区在四川盆地中的构造位置(据文献[14]修改); c. 茅口组综合柱状图(据文献[15-16, 38-40]修改)

喷发及勉略洋南苑被动大陆边缘伸展裂解的影响下^[32],川东地区发生明显的构造-沉积分异,北部发生沉降并沉积孤峰段深水硅质岩^[33-34];茅口组沉积末期,由于受到冰期以及东吴运动影响^[12],川东地区茅口组遭受不同程度剥蚀,形成茅口组顶部不整合面(图1c)。

由于早期勘探认识的不足,将茅口组自下而上划分为茅一段(茅一^c、茅一^b和茅一^a亚段)、茅二段(茅二^c、茅二^b和茅二^a亚段)、茅三段及茅四段^[35]。近年来随着研究深入,学者们发现将茅口组划分为茅一下亚段、茅一上亚段、茅二段、茅三下亚段、茅三上亚段和茅四段更符合勘探上的认识,并在实践中获得多口高产气流^[36]。

2 层序地层格架建立

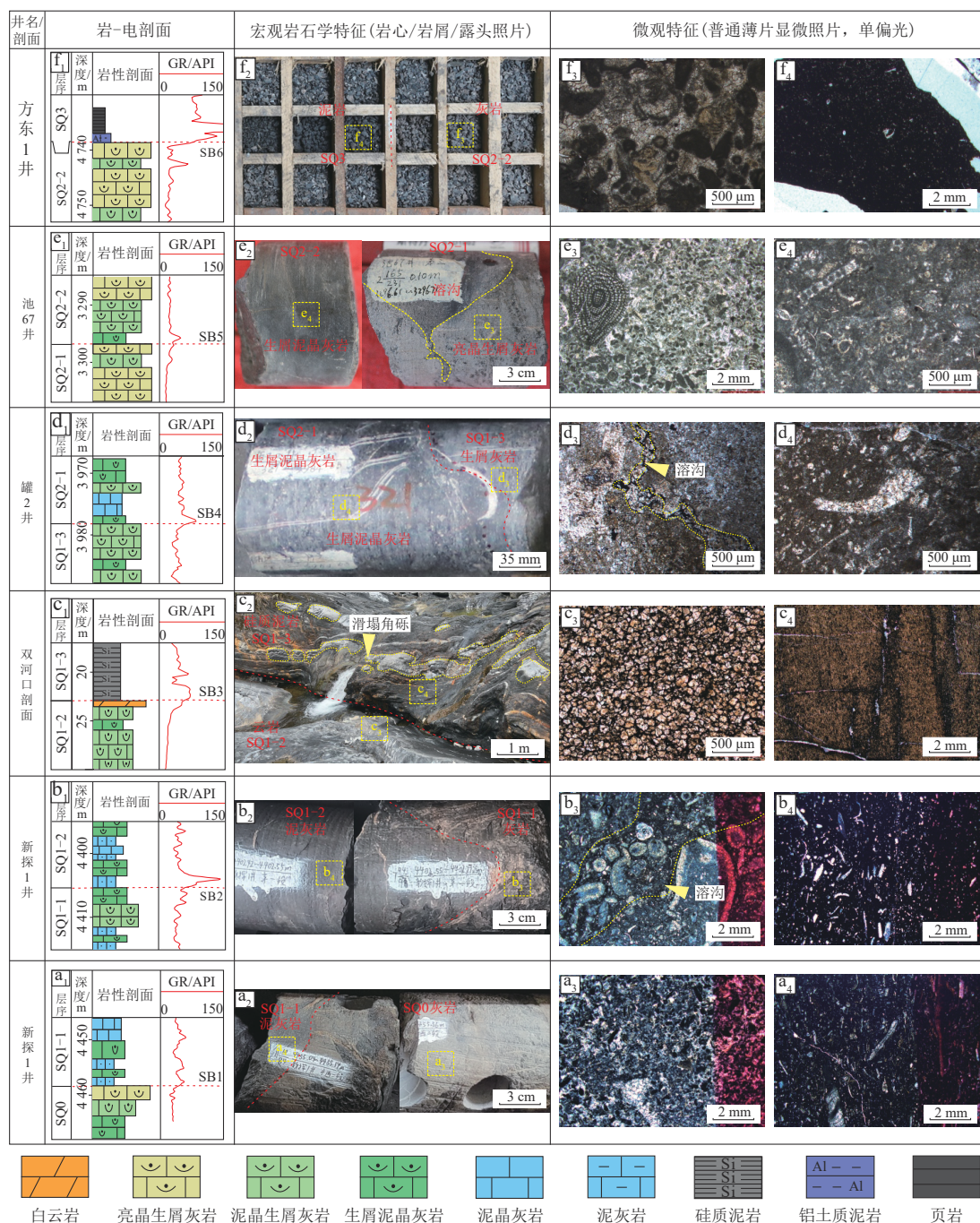
2.1 层序界面识别

中二叠统茅口组沉积时间为273.0~259.5 Ma,

以Vail经典层序地层学理论为指导,依据野外露头、钻井资料、地震资料以及岩石学宏微观特征,在茅口组识别出SB1—SB6共6个层序界面(图2—图4),包括3个三级层序界面和3个四级层序界面。

2.1.1 三级层序界面

SB1界面为茅口组底界面,在整个研究区均易于识别。该界面之下为栖霞组灰色泥-亮晶生屑灰岩(图2a₁—a₃),界面之上突变为茅口组黏土含量相对较高、富含有机质的泥灰岩和生物组分较少的低能泥晶灰岩韵律组合(图2a₁, a₂, a₄),是茅口组沉积初期最大规模海侵的结果,因此,该界面是典型的岩性-岩相转换面(图2a₁)。GR曲线表现为由箱状低值开始大幅度正向漂移的起始位置,反映沉积能量开始由强变弱(图2a₁)。成像测井上,界面之上呈亮色和暗色相间的薄互层状,界面之下为亮色中-厚层状(图3a),与界面上、下岩性相对应。通过地震标定,该界面在浅水相区



a₁. SB1界面上、下岩性柱状图(岩心往下归位3.20 m); a₂. SB1界面上、下岩性宏观特征,埋深4 455.04~4 455.56 m; a₃. SB1界面之下岩性,亮晶生屑灰岩,埋深4 455.15 m; a₄. SB1界面之上岩性,泥灰岩,埋深4 455.06 m; b₁. SB2界面上、下岩性柱状图(岩心往下归位3.20 m); b₂. SB2界面上、下岩性宏观特征,埋深4 402.42~4 402.77 m; b₃. SB2界面之下岩性,泥晶生屑灰岩、见溶沟,埋深4 402.75 m; b₄. SB2界面之上岩性,泥灰岩,埋深4 402.55 m; c₁. SB3界面上、下岩性柱状图; c₂. SB3界面上、下岩性宏观特征; c₃. SB3界面之下岩性,白云岩; c₄. SB3界面之上岩性,硅质岩; d₁. SB4界面上、下岩性柱状图(岩心往上归位5.00 m); d₂. SB4界面上、下岩性宏观特征,埋深3 983.95~3 984.05 m; d₃. SB4界面之下岩性,生屑灰岩、见溶沟,埋深3 984.04 m; d₄. SB4界面之上岩性,生屑泥晶灰岩,埋深3 983.99 m; e₁. SB5界面上、下岩性柱状图; e₂. SB5界面上、下岩性宏观特征,埋深3 296.55~3 296.71 m; e₃. SB5界面之下岩性,亮晶生屑灰岩,埋深3 296.68 m; e₄. SB5界面之上岩性,生屑泥晶灰岩,埋深3 296.58 m; f₁. SB6界面上、下岩性柱状图(岩心往下归位8.00 m); f₂. SB6界面上、下岩性宏观特征,埋深4 714.00~4 749.00 m; f₃. SB6界面之下岩性,亮晶生屑灰岩,埋深4 733.00 m; f₄. SB6界面之上岩性,泥页岩,埋深4 731.00 m

及深水相区均表现为明显的波峰反射特征(图4)。

SB4 界面为茅口组内部界面,在研究区南部台地

浅水区易于识别。该界面之下为灰色泥晶-亮晶生屑灰岩或白云岩,可见暗色溶沟特征(图2d,一d₁),界面

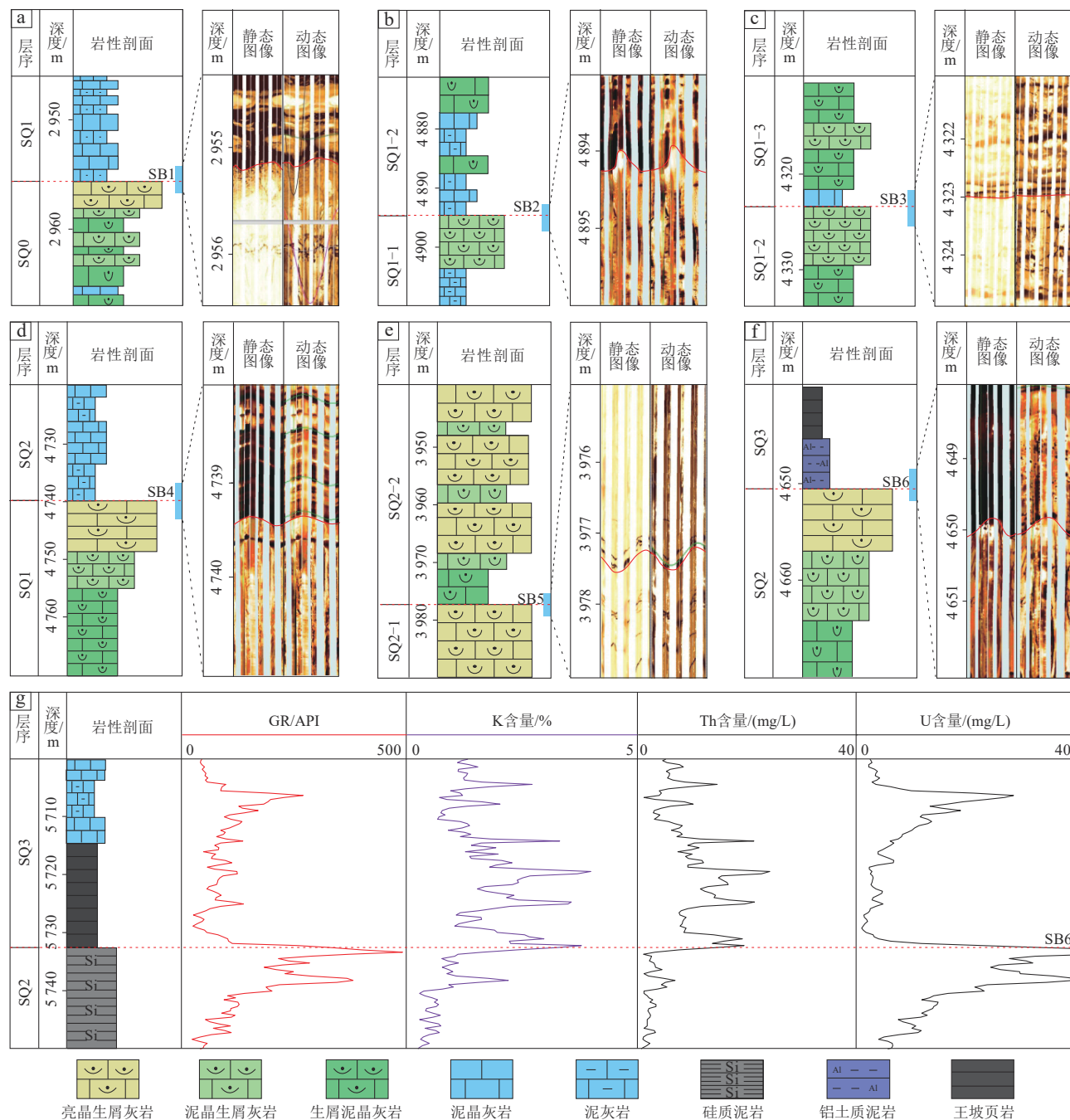


图3 川东地区茅口组层序界面上下成像测井及能谱测井响应特征

Fig. 3 Imaging logging and natural gamma-ray (GR) spectral logging responses above and below the sequence interface of the Maokou Formation, eastern Sichuan Basin

a. 鸣玉1井, SB1界面上、下成像测井特征; b. 石福1井, SB2界面上、下成像测井特征; c. 新探1井, SB3界面上、下成像测井特征; d. 石福1井, SB4界面上、下成像测井特征; e. 卧深1井, SB5界面上、下成像测井特征; f. 石福1井, SB6界面上、下成像测井特征(台地区); g. 普光5井, SB6界面上、下能谱特征(裂隙区)

之上则突变为深灰色生屑泥晶灰岩或泥灰岩(图2d₁, d₂, d₄), 是典型的岩性-岩相转换面。GR曲线表现为由低值开始大幅度正向漂移的起始位置, 反映沉积能量开始由强变弱(图2d₁)。成像测井上, 界面之上呈暗色层状特征, 界面之下呈亮色高阻块状特征(图3d), 局部可见斑状暗色溶沟, 与界面上、下岩性相对应。通过地震

标定, 该界面在浅水相区及深水相区均表现为明显的波峰反射特征(图4)。

SB6界面为茅口组顶界面, 在整个研究区均易于识别。深水区该界面之下为硅质泥岩, 界面之上为王坡页岩(图3g); 浅水区该界面之下为灰白色泥晶-亮晶生屑灰岩(图2f₁—f₃), 界面之上则均为黑色泥页岩,

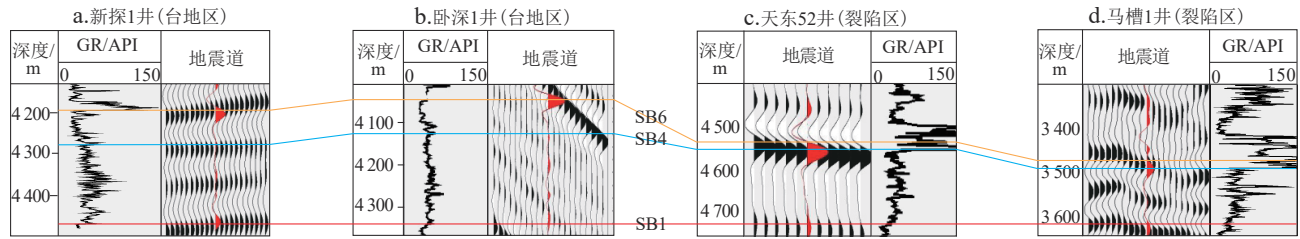


图4 川东地区层序界面在地震资料上的特征

Fig. 4 Seismic sections showing the characteristics of sequence interfaces of the eastern Sichuan Basin

且底部发育风化壳及铝土质泥岩(图2f₁, f₂, f₄), 为风化壳不整合面。测井资料上, 深水区该界面之下的硅质泥岩与界面之上的王坡页岩在自然伽马曲线上均表现为高值特征, 因此需要进一步结合能谱测井判断, 即界面之下表现为高U、低Th和低K元素含量值的偏还原环境特征, 而界面之上表现为低U、高Th和高K元素含量值的偏氧化环境特征(图3g); 浅水区则表现为GR曲线由箱状低值开始大幅度正向漂移的起始位置(图2f₁)。深水区整体缺乏成像测井资料, 而浅水区在成像测井上表现为界面之下呈亮色块状、界面之上呈暗色块状特征(图3f), 与界面上、下岩性相对应。通过地震标定, 该界面在浅水相区为波峰反射, 深水相区为零相位反射特征(图4)。

2.1.2 四级层序界面

SB2界面在整个研究区均易于识别。该界面之下为灰白色泥晶生屑灰岩(图2b₁—b₃), 且岩心和薄片下均可见明显的溶沟充填特征, 界面之上则突变为深灰色灰岩-泥灰岩韵律层(图2b₁, b₂, b₄), 因此, 该界面是典型的岩性-岩相转换面。GR曲线表现为数值由界面之下至界面之上的突然增大(图2b₁)。成像测井上, 界面之下为亮色中-厚层状, 靠近顶部可见暗色斑块状的溶沟, 与岩心和薄片观测现象相对应, 暗示该界面可能为一暴露面, 而界面之上为亮色-暗色薄互层状灰岩-泥灰岩韵律层, 因此, 该界面反映了典型的基准面由下降至上升的转换位置(图3b)。

SB3界面在研究区南部台地浅水区与北部海槽深水区具有不同的识别特征。深水区界面之下为厚层状灰白色生屑泥晶灰岩或白云岩(图2c₁—c₃), 界面之上突变为条带状硅质泥岩, 且其中可见大量的灰岩滑塌角砾(图2c₁, c₂, c₄); 浅水区界面之下为厚层状灰色泥晶生屑灰岩, 界面之上突变为生屑泥晶灰岩(图3c)。GR曲线在深水区表现为由低值大幅度快速正向漂移的转换处(图2c₁), 而浅水区表现为数值由下降至缓慢上升的转换处。深水区整体缺乏成像测井资料,

而浅水区在成像测井上表现为界面之下呈薄层状, 界面之上呈中-厚层状, 与界面上、下岩性产状相对应(图3c)。

SB5界面在研究区南部台地浅水区易于识别。该界面之下为灰色泥晶-亮晶生屑灰岩或白云岩, 可见暗色溶沟特征(图2e₁—e₃), 界面之上则突变为深灰色生屑泥晶灰岩或泥灰岩(图2e₁, e₂, e₄), 该界面是典型的岩性-岩相转换面。GR曲线表现为由低值开始大幅度正向漂移的起始位置, 反映沉积能量开始由强变弱(图2e₁)。成像测井上, 界面之上呈暗色层状特征, 界面之下呈亮色高阻块状特征(图3e), 局部可见斑状暗色溶沟, 与界面上、下岩性相对应。

2.2 层序划分方案

前人对茅口组层序划分大致可以归纳为2种方案, 分别将川东茅口组划分为2个三级层序^[7]和3个三级层序^[8-9]。然而, 上述划分均基于研究区北部茅口组顶部遭受严重剥蚀, 由于剥蚀程度争议较大, 导致划分方案存在差异性。本次研究发现研究区南、北地层分异并非剥蚀成因, 而是与构造-沉积分异引起的相变有关。

本文基于上述层序界面的识别, 结合沉积旋回以及岩石微相组合单元对研究区层序重新进行了划分, 共划分出2个三级层序, 由下自上依次为SQ1和SQ2, 并可进一步划分为5个四级层序, 分别为SQ1-1, SQ1-2, SQ1-3, SQ2-1和SQ2-2(图5)。SQ1和SQ2顶部以高能泥晶生屑灰岩和亮晶生屑灰岩为特征, 岩性垂向组合多为泥晶灰岩/生屑泥晶灰岩-泥晶生屑灰岩-亮晶生屑灰岩。四级层序中、上部也以高能泥晶生屑灰岩和亮晶生屑灰岩为主, 岩性垂向组合多为泥灰岩/泥晶灰岩-生屑泥晶灰岩-泥晶生屑灰岩/亮晶生屑灰岩。

海平面的升降总是伴随着沉积物的变化。海侵阶段, 水体深度加大, 沉积物中细粒物质更多, 当水体深度达到最大时, 沉积物中的细粒物质含量最多。GR

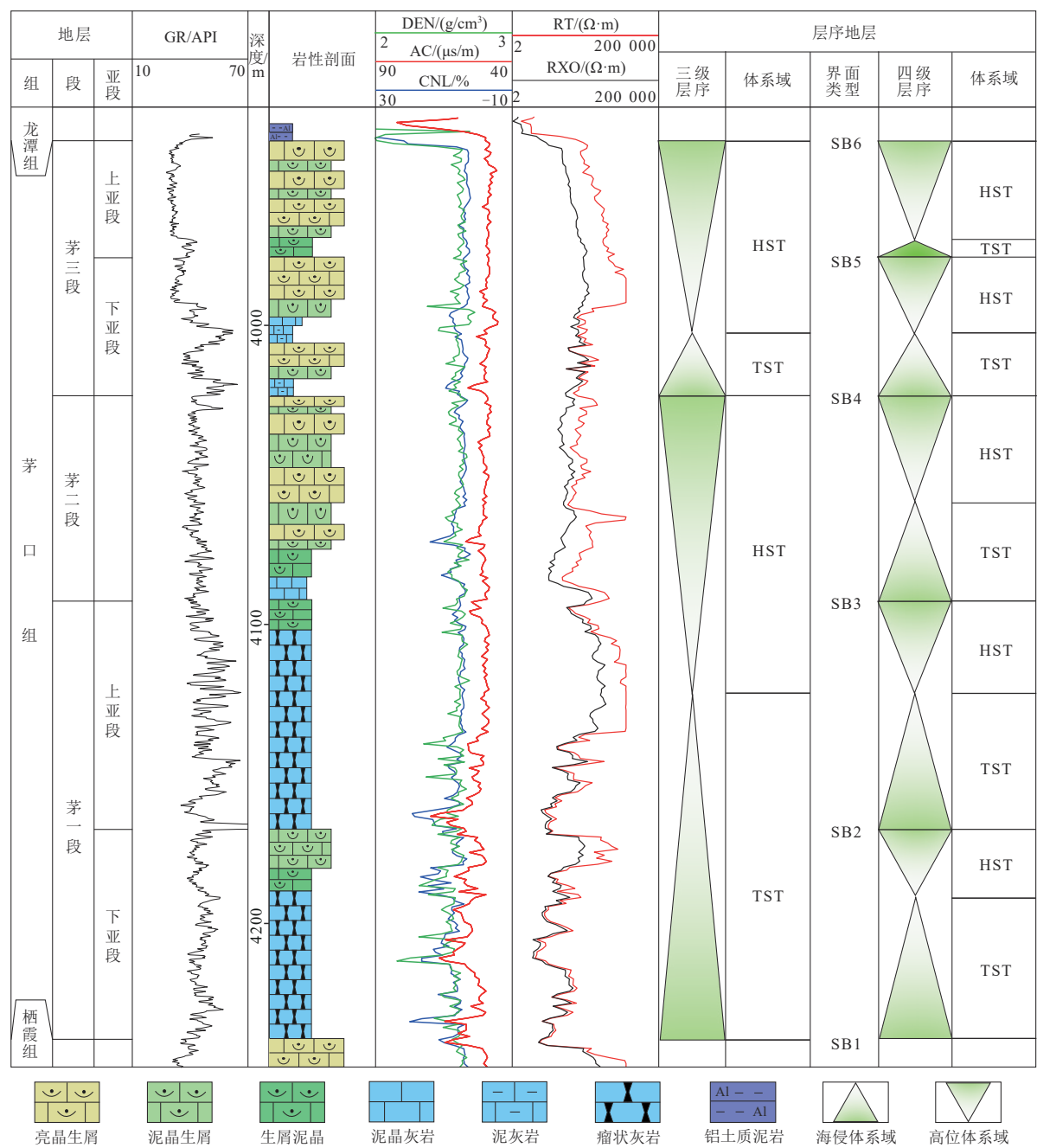


图5 川东地区卧深1井二叠系茅口组层序地层综合柱状图

Fig. 5 Synthetic stratigraphic column of sequences in the Permian Maokou Formation in well Woshen-1 in the eastern Sichuan Basin

曲线能较好地反映岩石中泥质含量的变化^[41],当GR值达到最大时,沉积物中泥质含量最多,则海平面上升到了最大海泛面,因此GR曲线的变化可以在一定程度上反映水体能量以及海平面的相对变化。中二叠世,川东地区海平面总体上经历了2个长期基准面旋回,对应2个三级层序,并可进一步划分为5个短期基准面旋回,对应5个四级层序。具体而言,SQ1沉积期发育非对称型的层序结构,海侵体系域的沉积厚度大于高位体系域,为长期持续海侵,表现为SQ1-1沉

积早期海平面开始缓慢上升,在SQ1-2沉积末期海平面达到最大,并开始快速下降。相反,SQ2沉积期海侵体系域的沉积厚度小于高位体系域,以快速海侵-缓慢海退层序结构为特征,表现为SQ2-1沉积早期海平面快速上升,中期海平面开始缓慢下降,直到SQ2-2沉积末期此次旋回才结束。岩性上,SQ1沉积期主要以相对低能的灰岩和泥灰岩沉积为主,含有少量的泥晶生屑灰岩;SQ2沉积期,低能灰岩含量较少,高能岩性占比增大。

3 层序地层展布特征

通过野外剖面及川东地区测井资料对比,发现剖面与井横向对比性较好,可以进行等时对比。根据川东地区层序界面的识别标志和划分方案,结合碳酸盐岩层序地层学的理论方法,选取研究区内典型井进行横向等时对比,明确层序展布与充填规律。

3.1 连井格架

研究区内NE-SW向总体上表现为南厚北薄的特征,SQ1和SQ2在双河口剖面附近厚度均达到最小,至北缘团城剖面厚度突然增大。具体而言,SQ1-1地层厚度由南向北整体呈现出逐渐减薄的趋势,但研究区中部卧深1、张12、天东9及渡2井区沉积相对最厚,岩性上均以灰岩-泥灰岩韵律为特征。SQ1-2地层厚度变化趋势与SQ1-1基本一致,具有南厚北薄的特征。SQ1-3地层厚度在卧深1井以南变化不大,但往北逐渐减小,在双河口剖面最小,至团城剖面突然增大。SQ2-1地层横相分布趋势与SQ1-3具有一定的继承性,卧深1井与天东91井沉积厚度较大,而两者之间的张12井沉积厚度较小,这可能与低能泥灰岩沉积有

关;此外,SQ2-1在卧深1井往南地层厚度具有变小的趋势,而天东91井以北的渡2井、鹰探1井以及双河口剖面地层厚度明显减小,为深水硅质泥岩沉积,在团城剖面厚度再次增大,可达50 m,为高能生屑灰岩沉积;SQ2-2继承了SQ2-1的沉积特征,厚度特征与SQ2-1相似(图6,图7)。

3.2 层序平面展布

在单井和连井层序划分及对比的基础上,统计研究区露头及钻井资料的四级层序厚度,分别绘制对应的层序厚度平面图,揭示茅口组各沉积期层序平面分布特征以及充填规律。

研究区茅口组沉积充填厚度整体表现为南厚北薄的特征,但不同时期略有差异。SQ1-1总体上表现为南北薄、中间厚的特征,根据地调资料发现研究区最北端沉积厚度最薄,等值线较为密集,具有地势急剧突变的特征,在奉节处沉积厚度最厚,达到80 m左右(图8a)。SQ1-2总体表现为南厚北薄的特征,太和1井一板东16井区沉积最厚,可达90 m左右,其次为咸宜—高楼—大宁河,而鹰探1井—田坝—奉节及乱石窖—大宁河以北沉积较薄,最薄处只沉积10 m左右(图8b)。SQ1-3总体继承了SQ1-2沉积期的厚度分布规律,研

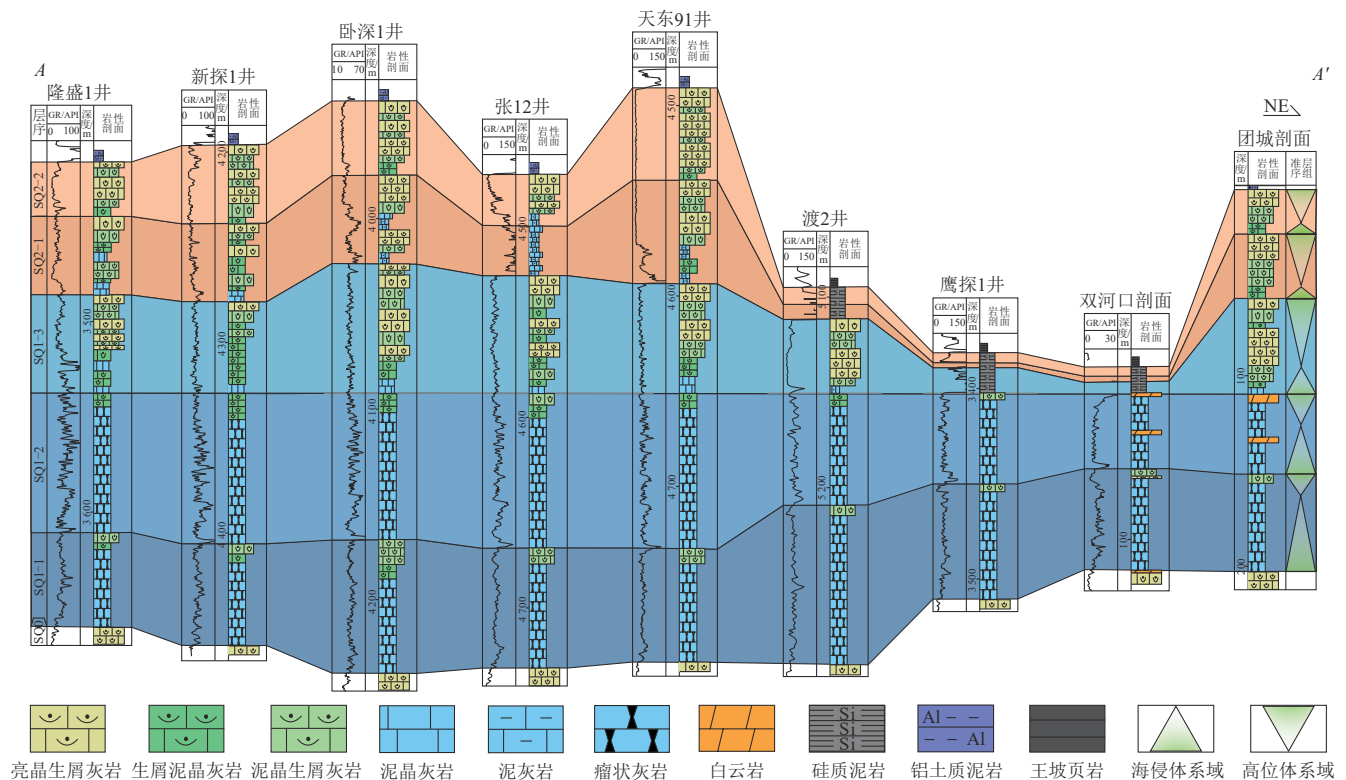


图6 川东地区茅口组层序地层对比连井剖面(剖面位置见图1a)

Fig. 6 Cross-well sequence stratigraphic correlation of the Maokou Formation, eastern Sichuan Basin (see Fig 1c for the section location)

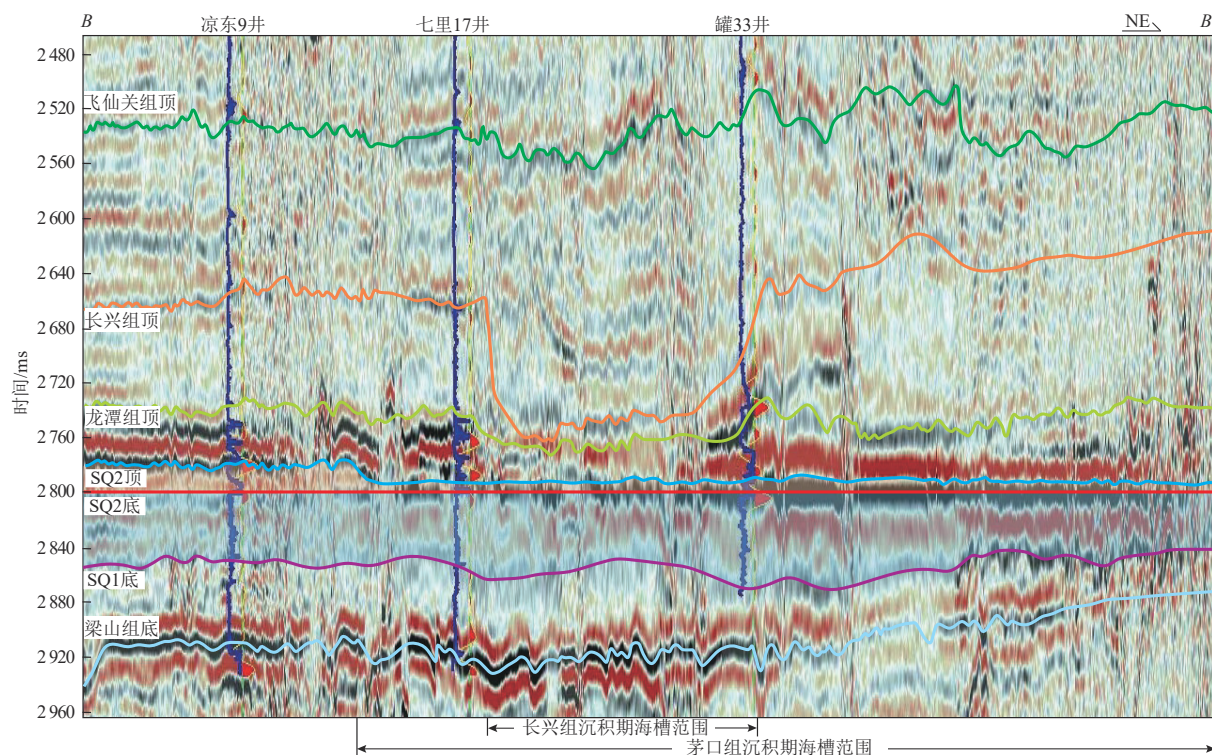


图7 川东地区B—B'地震剖面反射特征(SQ2底拉平,剖面位置见图1a)

Fig. 7 Reflection characteristics of seismic section B-B' in the eastern Sichuan Basin (SQ2 bottom flattened; see Fig 1c for the section location)

究区南部沉积较厚,而北部较薄区具有扩大的趋势, SQ1-2的鹰探1井—田坝—奉节地层较薄区延伸至 SQ1-3的渡2井—云安6井,乱石窖—大宁河以北沉积依旧较薄(图8c)。SQ2-1在SQ1-3基础上进一步继承发育,南北厚度分异明显:在忠县—天东91井、丰都—卧深1井及团城—高楼—大宁河沉积较厚,在太和1井—卧深1井以南、忠县—天东91井以北、巫溪—双河口以南及乱石窖—大宁河以北沉积较薄,最薄处仅为10 m(图8d)。SQ2-2总体上依然呈现出南厚北薄的地貌格局,团城—大宁河、忠县—张12井及太和1井—铜4井附近沉积较厚(图8e)。

4 讨论

4.1 层序充填规律

基于上述层序地层展布特征,结合岩性分析,揭示了研究区茅口组层序充填规律(图9)。研究区SQ1-1和SQ1-2表现为中部厚、南北薄的特征,以碳酸盐岩台地相沉积为主^[7],沉积岩性主要以泥灰岩为特征,沉积能量相对较低,表明整体以填平补齐为特征^[42-43],乱石窖剖面以北沉积厚度最薄,以硅质岩沉积为主,为欠补

偿沉积,该阶段研究区南、北沉积地貌高而中部低。SQ1-3沉积期,马槽1井—云安6井区开始沉积相对深水的硅质泥岩,且厚度明显小于其他区域,为欠补偿海槽相沉积,而云安6井以南地区及马槽1井以北地区以灰岩沉积为主,该区域厚度较大,为碳酸盐岩台地沉积。SQ2-1转变为明显的南厚北薄特征,欠补偿沉积区范围明显增大,具体表现为拔向1井—马槽1井区间及乱石窖以北地区沉积厚度较薄,均为低能硅质泥岩沉积,以海槽相沉积特征为主^[14]。相反,相37井—拔向1井区间及乱石窖附近沉积厚度较大,且以发育高能滩相灰岩为特征,表明构造—沉积分异导致不同区域地层沉积充填速率发生显著分异,在地貌高部位的浅水台地高能环境下形成厚层碳酸盐岩,而在地貌低部位的深水低能环境中则形成欠补偿薄层硅质泥岩。SQ2-2地层厚度特征与SQ2-1层序相似,反映了地层沉积充填的继承性。值得注意的是,研究区台地和断陷区域存在2种不同的沉积充填过程,具体表现为差异构造升降导致台地水体相对较浅,主要以碳酸盐岩垂向加积为主,地层厚度较大;相反,断陷部位水体较深,沉积岩性主要为硅质泥岩及泥灰岩,总体上为欠补偿沉积,地层厚度较薄。由此可见,在中二叠世川东地区构造分异控制了其沉积分异。

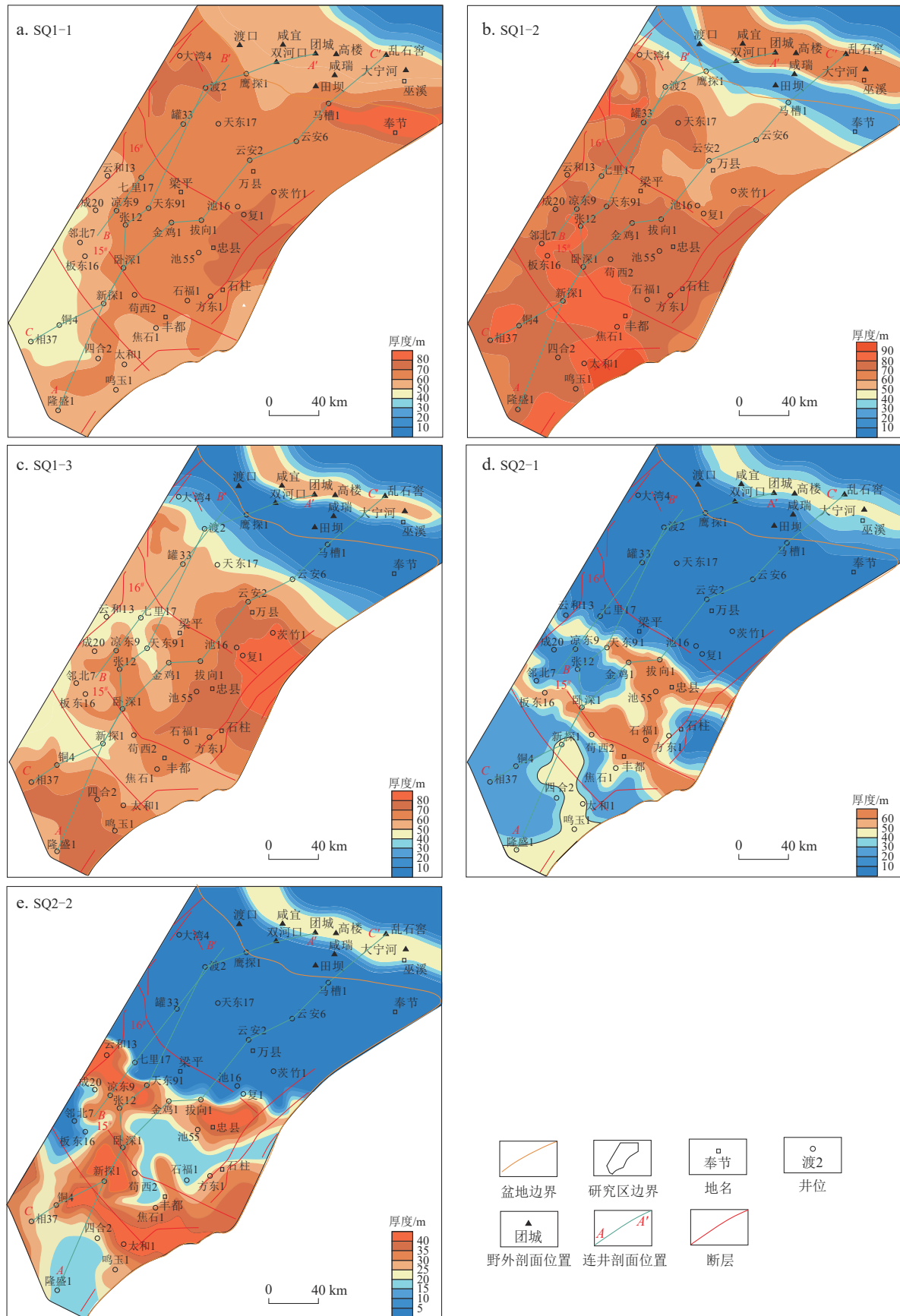


图 8 川东地区茅口组沉积期各层序厚度平面分布

Fig. 8 Isopach maps of sequences formed during the deposition of the Maokou Formation in the eastern Sichuan Basin

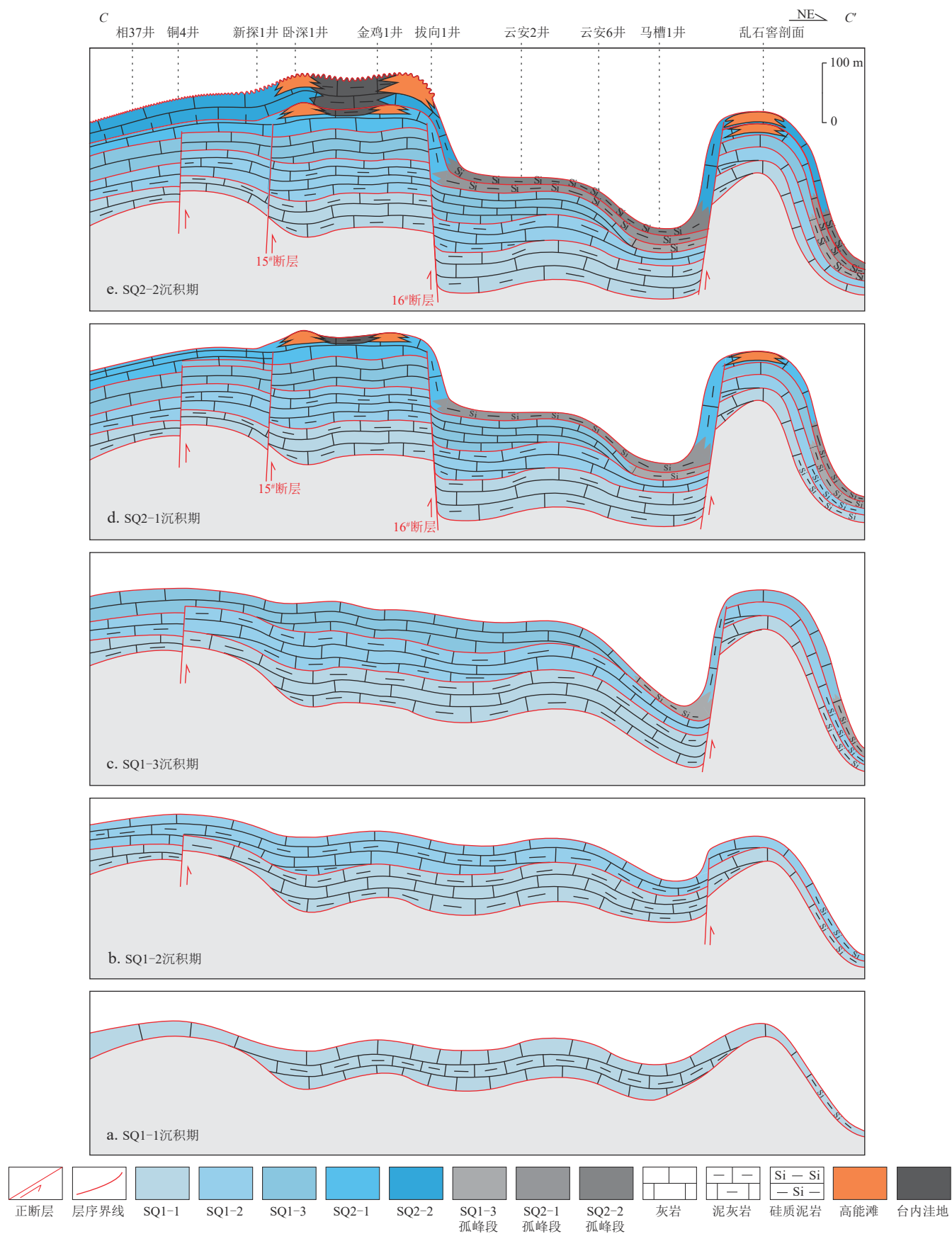


图9 川东地区茅口组构造-层序充填示意图(剖面位置见图1a)

Fig. 9 Schematic diagram showing the structure and sequence filling in the Maokou Formation, eastern Sichuan Basin
(see Fig. 1a for the section location)

4.2 克拉通陆内裂陷演化过程

对于古地貌恢复,前人常用印模法和残厚法^[44]。茅口组沉积早期以填平补齐为主,受沉积前地貌影响严重,因此本文使用印模法对SQ1沉积古地貌进行恢复。徐平生等^[45]认为茅二段沉积期已基本填平补齐,沉积地貌对茅口组后续沉积基本无影响,SQ1与SQ2界面在区域上具有等时性,因此本文采用残厚法对SQ2沉积古地貌进行恢复。

4.2.1 SQ1沉积前期

川东地区地貌整体相对较低,初期海侵使得全区被海水所淹没,整体以填平补齐沉积为主,形成了在全区分布的茅一段灰岩-泥灰岩韵律层。SQ1沉积期古地貌分异不明显,克拉通陆内裂陷尚未发育,区内基本上继承了栖霞组沉积末期古地貌^[46],整体表现为南北高、中间低的古地貌特征。具体而言,研究区南缘云和13井—新探1井—隆盛1井—丰都—石柱、咸宜—双河口—大宁河及巫溪—田坝以北较高,在研究区中部金鸡1井—梁平存在地貌次高,在乱石窖剖面以北地区地貌最低(图10a)。

4.2.2 SQ1沉积中-晚期

川东地区仍以填平补齐为特征,岩性与SQ1沉积前期一致,均以沉积灰岩-泥灰岩韵律层为特征。研究区基本继承了SQ1沉积前期的古地貌,整体表现为南北高、中间低。然而,研究区北缘田坝—渡口沉积古地貌明显较低,且沉积岩相具有向深水相转变的特征,呈现出初始的沉积分异特征,推断为初始裂陷期(图10b),该阶段克拉通陆内裂陷开始发育。

4.2.3 SQ2沉积早期

研究区沉积分异明显加剧,凹陷地区水体深,以欠补偿沉积为特征,沉积厚度小,而地貌高地沉积速率快,沉积厚度较凹陷地区明显增大。具体而言,SQ2沉积前期在忠县—天东91井、丰都—邻北7井、隆盛1井—新探1井及团城—大宁河沉积厚度大,为40~70 m(图8d),岩性以高能灰岩为主的滩相沉积(图2e₁)^[47],地貌较高,地貌高地呈NW-SE向分布;与此同时,在研究区南缘也发育相对地貌低地区,如成20井区和张12井区,沉积厚度较小,为10~30 m(图8d),岩性以低能钙质泥岩为主(图11h)。此外,复1井—云和13井与团城—大宁河之间沉积厚度最小,不足10 m(图8d),岩性以硅质泥岩为代表的孤峰段深水沉积(图11f),为海

槽相沉积^[47],此区域沉积古地貌最低,为凹陷区,相较于SQ1沉积中-晚期,其分布范围剧烈扩张,推断为快速裂陷期(图10c)。

4.2.4 SQ2沉积中-晚期

研究区基本继承了早期的古地貌特征,整体上依旧为南高北低的古地貌特征。地貌高地为NW-SE向,主要位于团城—大宁河、忠县—张12井及鸣玉1井—铜4井,该区域沉积厚度最大,为20~50 m(图8e),岩性以高能亮晶生屑灰岩为主(图2f₃)。地貌低地主要位于乱石窖以北地区以及云安6井—大湾4井,该区域沉积厚度最小,不足10 m(图8e),岩性以硅质泥岩为主。与SQ2沉积早期相比,地貌高部位与地貌低部位的沉积厚度差异具有增大的趋势,暗示差异隆升活动进一步加剧,为裂陷持续发育期(图10d)。

由此可见,研究区茅口组沉积期已经形成规模裂陷沉降区,且从地震剖面上可见该阶段沉降形成的深水规模范围明显大于长兴组沉积期(图7),这很大程度对裂陷海槽由茅口锥形期演变为长兴成形期的传统观点提出了挑战。中-晚二叠世,裂陷海槽的规模变化可能意味着茅口组沉积期才是区域构造-沉积的快速分异阶段,而至长兴组沉积期是一个海槽逐渐“消亡”的过程,并于早三叠世飞仙关组沉积期完全被填平补齐^[48]。以上具体过程,尤其是长兴组沉积期海槽的发育演化,有待重新评估和深化研究。

4.3 对ELIP的响应

传统观点认为,ELIP岩浆影响范围是以大理—丽江—米易为中心向外至内带、中带^[49],与四川盆地有一定距离,且在260~259 Ma发生快速侵位和喷发^[50]。然而,近期研究发现四川盆地内部同样发育规模火山岩,且主要集中分布在NW向与NE向深大断裂交汇处,与ELIP火山-岩浆活动引起的基底断裂再活化有关^[25]。此外,地球物理面波层析成像发现扬子陆块地壳和岩石圈上存在一条NE向的高速带,被解释为与ELIP有关的热点轨迹残留^[51],即随着扬子板块二叠纪由南向北漂移并顺时针旋转,热点从川东北向川西南“移动”^[16]。以上研究结果表明ELIP的影响范围大大增加,并可能深刻改变二叠纪四川盆地地貌。

与此同时,近期在四川盆地内部及周缘相继发现火山灰夹层,且锆石定年结果显示,ELIP具有从中二叠世早-中期至末期的多幕式活动特征^[15-16,52],表明ELIP的活动时限大大增加。有意义的是,在研究区内15°和16°断裂带附近的野外露头,玄武岩中火山灰的

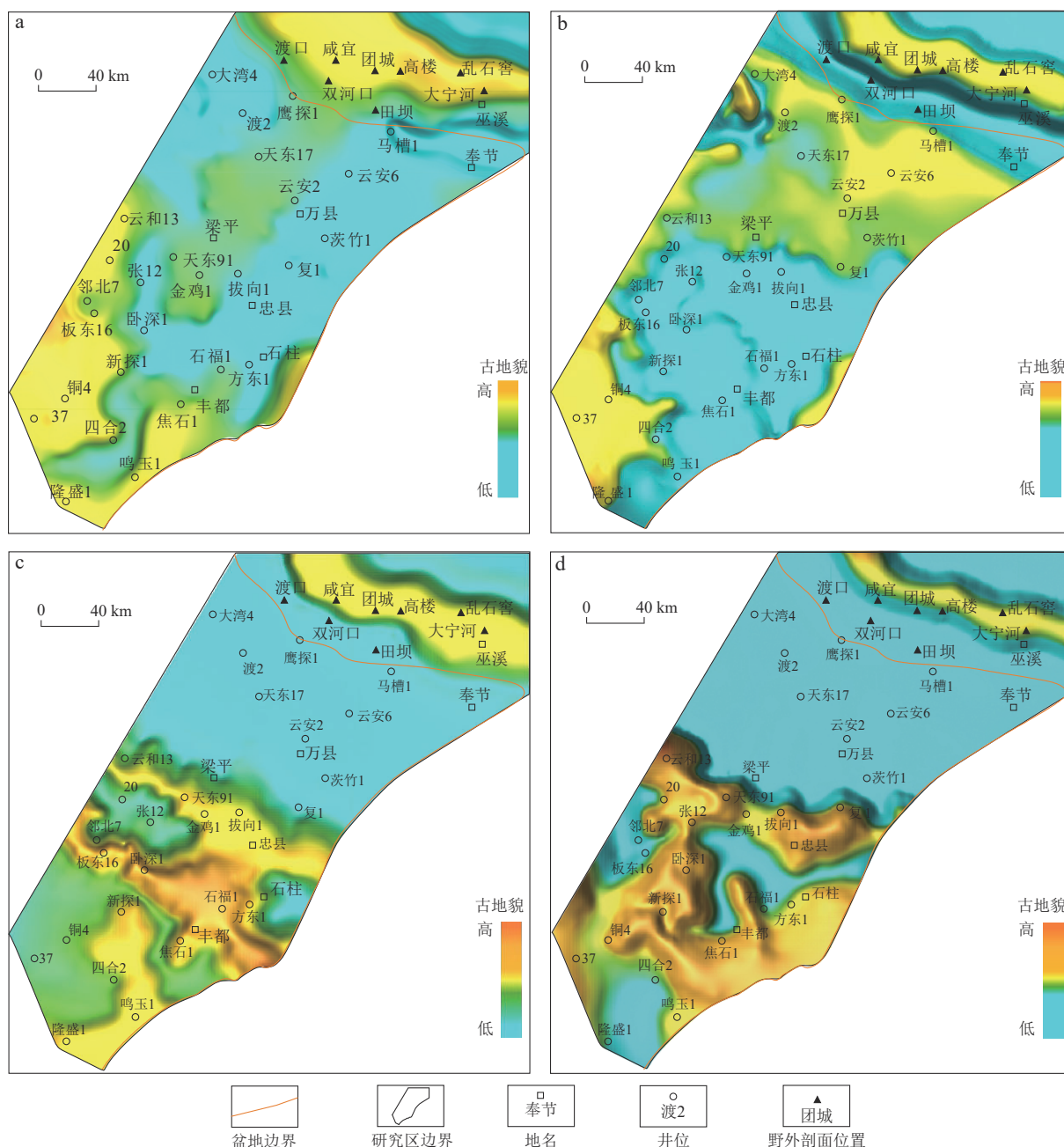


图10 川东地区中二叠世沉积古地貌

Fig. 10 Depositional paleogeomorphology of the Middle Permian in the eastern Sichuan Basin

a. SQ1沉积前; b. SQ1-2沉积期(初始裂陷期); c. SQ2-1沉积期(快速裂陷期); d. SQ2-2沉积期(裂陷稳定期)

锆石定年结果为 $267 \text{ Ma} \pm 3 \text{ Ma}^{[15]}$, 对应沃德阶(茅二段)。进一步结合本次研究推断, 研究区茅口组沉积期裂陷的形成由北向南逐渐扩张, 极可能与热点由北向南“移动”有关, 在经过研究区产生火山-岩浆作用的同时, 诱导 15° 和 16° 基底断裂活化, 从而导致研究区 NW 向与 NE 向深大断裂交汇处玄武岩的发育分布 (图 1a), 并可能通过软流圈上升流或热沉降效应引起多期构造-沉积的分异。以上表明, 四川盆地茅口组沉积期的裂陷活动可能是 ELIP 幕式活动的产物, 并控

制了地层沉积充填过程与规律, 相关认识还需后续进一步深化。

4.4 常规-非常规天然气勘探有利区新发现

坡折带是个地貌学概念, 指地形坡度发生突变的地带^[53], 不论在沉积盆地中还是在剥蚀区都可能发育, 泛指从坡折和坡脚及其附近明显受斜坡地形控制的侵蚀和沉积作用活跃地带^[54]。坡折带两侧由于沉积水体能量的差异而具有不同的岩性和岩相特征。根

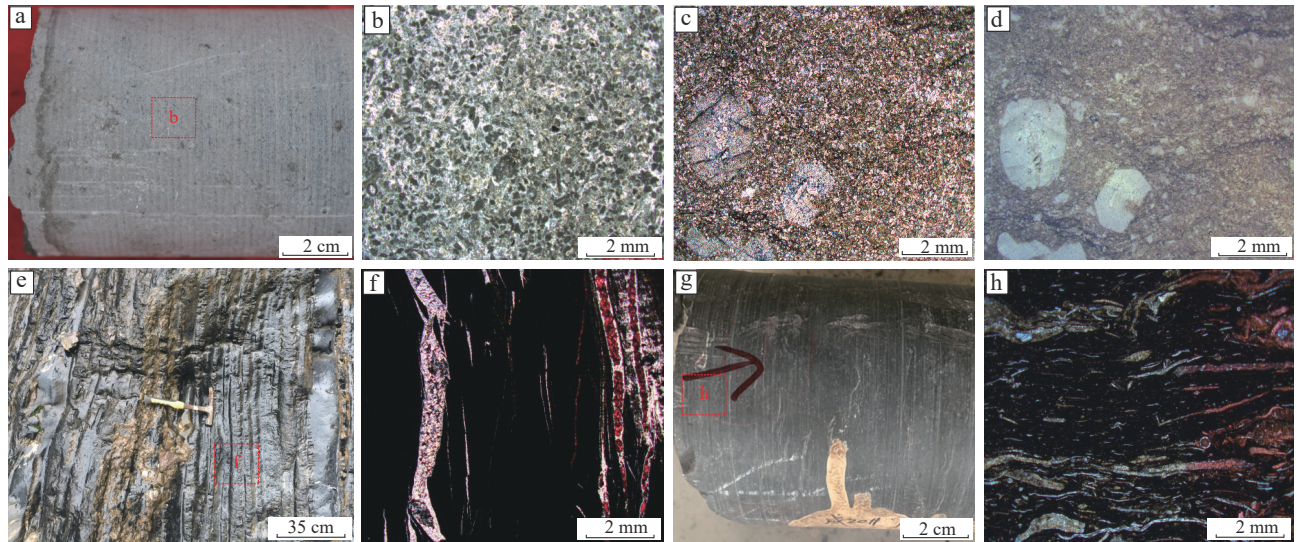


图11 川东地区台地高能滩、洼地及裂隙区岩性特征照片

Fig. 11 Photos and images showing the lithologic characteristics of high-energy shoals, low-lying areas, and rift areas in the carbonate platform within the eastern Sichuan Basin

a. 灰白色生屑灰岩,池67井,SQ2-1,埋深3 300.52~3 300.74 m,岩心;b. 亮晶生屑灰岩(a图中红色框为磨片位置),埋深3 300.55 m,普通薄片,单偏光;c. 白云岩,池67井,SQ2-1,埋深3 313.21 m,普通薄片,单偏光;d. 白云岩,见大量生屑颗粒物,为c图垫白纸后特征,普通薄片,单偏光;e. 薄层硅质泥岩,双河口剖面,SQ2-1,野外照片;f. 硅质泥岩(e图中红色框为磨片位置),普通薄片,单偏光;g. 钙质泥岩,成20井,SQ2-1,埋深3 366.15~3 366.25 m,岩心;h. 钙质泥岩(g图中红色框为磨片位置),埋深3 365.90 m,普通薄片,单偏光

据研究区古地貌特征及对应岩石学分异特征可以确定各个时期坡折带的分布位置,进而划分不同区域的沉积环境。川东地区茅口组沉积期陆内裂陷的演化过程表明,茅口组沉积古地貌在早期继承栖霞组沉积末期古地貌的基础上,中-晚期由北向南逐级沉降,最终在SQ2沉积期形成较为稳定的NE-SW向地貌坡折带。地貌坡折带外侧通常水体较深,沉积水体能量较低,为富有机质泥灰岩和泥页岩组成的海槽相;坡折带内侧则水深较浅,沉积水体能量较高,通常为碳酸盐岩台地相。因此,可以认为地貌坡折带控制着孤峰段深水泥页岩与茅口组浅水碳酸盐岩高能滩相的分布。

早期研究认为,川东地区茅口组仅存在一期坡折带,大致分布于丰都—邻北7井,而本次研究发现可能受ELIP热点由北向南“移动”以及幕式活动的影响,先后引起16°和15°等多个NW-SE向基底断裂的活化,从而导致区域多期构造—沉积分异,并形成多期、多带坡折地貌,分别为大湾4—云安6井、成23井—忠县以及丰都—邻北7井,造成了研究区常规和非常规天然气勘探区的分布差异。

对于常规天然气勘探区,已有研究表明,茅口组颗粒滩相具有较好的孔渗条件,加之沉积地貌高,在高频旋回中容易暴露形成溶沟和溶洞,因此是早期岩溶改造的有利场所^[46,55]。这些早期岩溶作用形成的孔洞可为沉积成岩期的富镁白云石化流体提供优势空间^[56],

从而有利于白云石化作用的发生。由于白云岩较灰岩具有更好的抗压能力,在后期埋藏过程中能保留大部分孔隙(晶间孔)。综上,高能颗粒滩是研究区优质常规储层的基础和重要载体^[57]。然而在SQ2-1沉积期,过去仅关注到丰都—邻北7井发育台缘浅滩,主要岩性为高能亮晶生屑灰岩(图11a,b)或白云岩(图11c,d),而本次发现该台缘带较过去认为的展布更加复杂,主要的坡折带分布于成23井—忠县,因此,除了丰都—邻北7井发育台缘浅滩外,还存在成23井—忠县的台缘浅滩,且两者之间由忠县—丰都的NE向浅滩相连,从而整体形成“工”字形高能浅滩区,有利勘探区大大扩展。对池67井和池4井共35个白云岩样品进行物性分析发现,孔隙度在1.26%~8.63%,平均值可达2.88%,渗透率平均值达 $0.78 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。同时在钻井上也取得了一定的成果,如池67井茅三下亚段钻遇白云岩厚度24.1 m,测试获气 $2.21 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;卧93井茅三下亚段钻遇白云岩厚度23.5 m,测试获气 $26.48 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,证明该滩相区可作为良好的储集体。加之该高能滩区与周缘低洼区域孤峰段烃源岩形成“旁生侧储”的良好源—储配置^[11],有望形成规模勘探区(图12)。

对于非常规天然气勘探区,在SQ1沉积晚期大湾4井—云安6井坡折带外侧,孤峰段深水相纵向上发育于SQ1上部,在盆地内主要位于鹰探1井—马槽1井区,

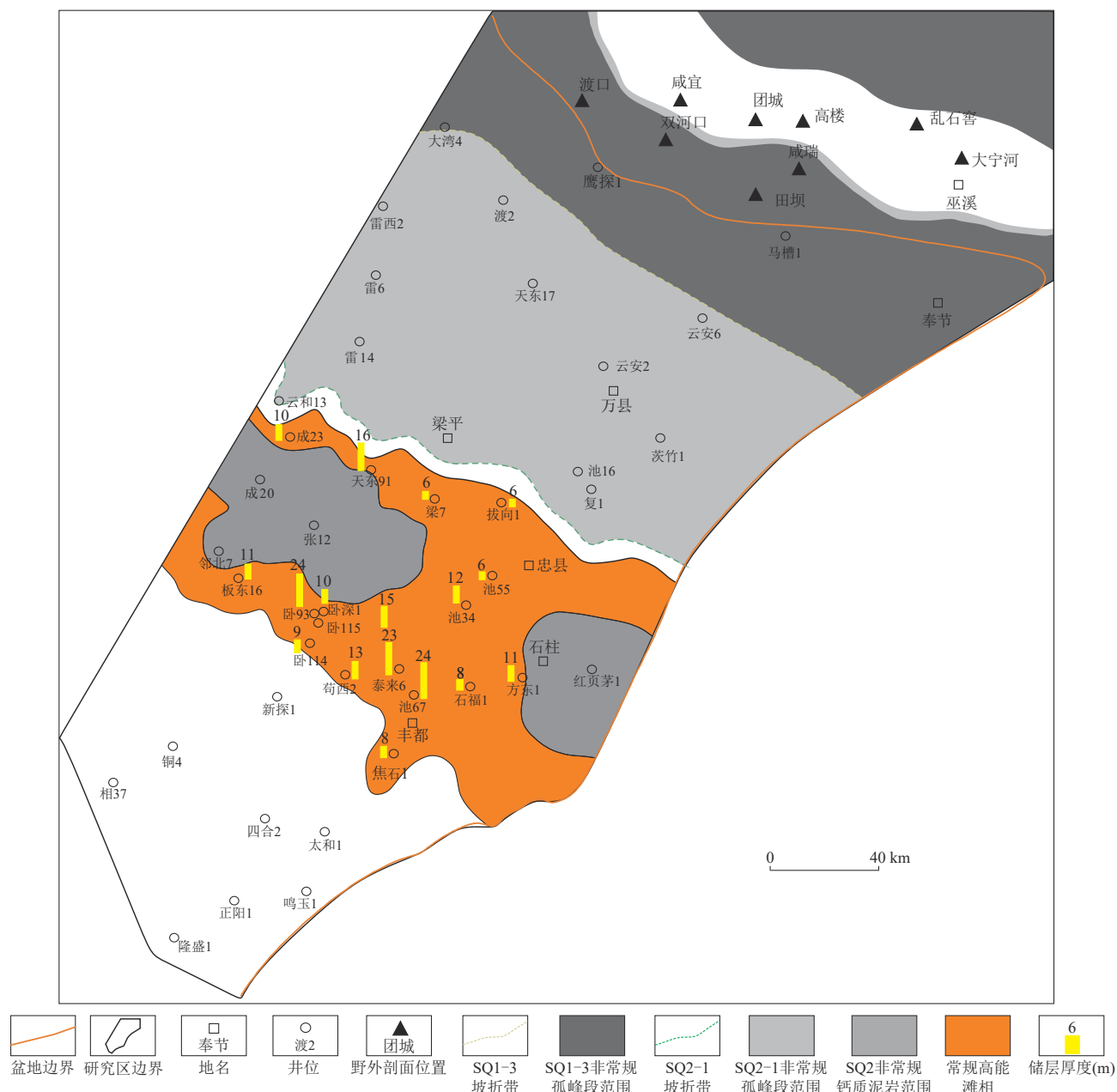


图12 川东地区中二叠统常规-非常规天然气勘探区

Fig 12 Map showing the conventional and unconventional natural gas play fairways of the Middle Permian in the eastern Sichuan Basin

主要岩性为硅质泥岩(图11e,f)。该区域孤峰段厚度10~30 m,平均总有机碳含量(TOC)大于7.00%^[58-59],是区内孤峰段烃源岩最有利的发育区,同时也是孤峰段非常规油气最有利的潜在勘探区。SQ2沉积期孤峰段深水相在盆内主要位于渡口—梁平—奉节区域,该区域孤峰段厚度5~25 m,平均TOC大于5.00%^[11],是区内孤峰段烃源岩发育与非常规油气勘探的次有利区。与此同时,本次研究还发现石柱、成20井以及张12井区的孤峰段并非深水泥页岩,而是碳酸盐岩台地内相对低洼区域沉积的钙质泥岩(图11g,h),厚度10~30 m。针对该类岩性对成20井13个样品进行

TOC测试分析发现,成20井孤峰段TOC介于0.42%~6.40%,平均值可达4.12%,近期钻井结果显示,在该区域红叶茅1井SQ2地层测试获得 $6.45 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的工业气流^[60],有望成为有利的非常规油气勘探区,并揭示一类台地内部富有机质非常规天然气勘探新领域。

5 结论

1) 川东地区二叠世裂陷活动在中二叠世早-中期已经开始,表现为茅一段沉积晚期进入初始裂陷期,茅二段沉积期随着15#和16#基底断裂活化,沉积地貌演

变为“南台地、北裂陷”特征;茅三段沉积早期以后进入裂陷持续发育期。这可能指示了茅三段沉积期才是区域构造-沉积快速分异的阶段。

2) 研究区发育多期、多带坡折地貌。新发现的成23井一忠县的台缘浅滩带有望拓展常规天然气有利勘探区;明确了石柱以及成20、张12井区的孤峰段为碳酸盐岩台地内相对低洼区域沉积,有望揭示一类台地内部富有机质非常规天然气勘探新领域。

参 考 文 献

- [1] 刘树根, 王一刚, 孙玮, 等. 拉张槽对四川盆地海相油气分布的控制作用[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2016, 43(1): 1-23.
LIU Shugen, WANG Yigang, SUN Wei, et al. Control of intracratonic sags on the hydrocarbon accumulations in the marine strata across the Sichuan Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2016, 43(1): 1-23.
- [2] 何骁, 唐青松, 邬光辉, 等. 四川盆地安岳气田震旦系走滑断裂控储作用[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(6): 1116-1127.
HE Xiao, TANG Qingsong, WU Guanghui, et al. Control of strike-slip faults on Sinian carbonate reservoirs in Anyue Gas Field, Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(6): 1116-1127.
- [3] 付东阳, 汪功怀, 彭鑫岭, 等. 普光气田长兴组礁滩体精细刻画及认识[J]. 断块油气田, 2023, 30(6): 975-981.
FU Dongyang, WANG Gonghuai, PENG Xinling, et al. Fine characterization and understanding of reef-shoal bodies in Changxing Formation of Puguang Gas Field[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2023, 30(6): 975-981.
- [4] YANG Wenjie, TAN Xiucheng, TANG Dahai, et al. Sequence lithofacies paleogeography evolution of the Middle Permian Maokou Formation in the northwest margin of the Sichuan Basin[J]. Frontiers in Earth Science, 2024, 11: 1301302.
- [5] 王一刚, 文应初, 张帆, 等. 川东地区上二叠统长兴组生物礁分布规律[J]. 天然气工业, 1998, 18(6): 25-30, 7-8.
WANG Yigang, WEN Yingchu, ZHANG Fan, et al. Distribution law of the organic reefs in Changxing Formation of Upper Permian in east Sichuan[J]. Natural Gas Industry, 1998, 18(6): 25-30, 7-8.
- [6] 周进高, 姚根顺, 杨光, 等. 四川盆地栖霞组-茅口组岩相古地理与天然气有利勘探区带[J]. 天然气工业, 2016, 36(4): 8-15.
ZHOU Jingao, YAO Genshun, YANG Guang, et al. Lithofacies palaeogeography and favorable gas exploration zones of Qixia and Maokou Fms in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(4): 8-15.
- [7] 黎荣, 胡明毅, 杨威, 等. 四川盆地中二叠统沉积相模式及有利储集体分布[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(2): 369-379.
LI Rong, HU Mingyi, YANG Wei, et al. Sedimentary facies model and favorable reservoir distribution of the Middle Permian in Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(2): 369-379.
- [8] 覃建雄, 曾允孚, 陈洪德, 等. 西南地区二叠纪层序地层及海平面变化[J]. 沉积与特提斯地质, 1998, 18(1): 19-35.
QIN Jianxiong, ZENG Yunfu, CHEN Hongde, et al. Permian sequence stratigraphy and sea level changes in southwestern China[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 1998, 18(1): 19-35.
- [9] 胡明毅, 胡忠贵, 魏国齐, 等. 四川盆地茅口组层序岩相古地理特征及储集层预测[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(1): 45-55.
HU Mingyi, HU Zhonggui, WEI Guoqi, et al. Sequence lithofacies paleogeography and reservoir prediction of the Maokou Formation in Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(1): 45-55.
- [10] 陈卫东, 陈义才, 徐发波, 等. 四川盆地东部中二叠统茅口组地层划分、对比与岩溶古地貌恢复[J]. 天然气工业, 2021, 41(6): 27-36.
CHEN Weidong, CHEN Yicai, XU Fabo, et al. Stratigraphic division and correlation and karst palaeogeomorphology restoration of the Middle Permian Maokou Formation in the eastern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(6): 27-36.
- [11] 刘昇, 范存辉, 张本健, 等. 四川盆地东部中二叠统茅口组孤峰段展布特征及其油气地质意义[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(4): 993-1008.
LIU Sheng, FAN Cunhui, ZHANG Benjian, et al. Distribution characteristics of Gufeng Member of the Middle Permian Maokou Formation, eastern Sichuan Basin and its petrogeological significance[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(4): 993-1008.
- [12] 胡罗嘉, 黄世伟, 谭万仓, 等. 四川盆地东部二叠系茅口组层序地层特征及地质意义[J]. 海相油气地质, 2021, 26(4): 357-366.
HU Luoia, HUANG Shiwei, TAN Wancang, et al. Sequence stratigraphic characteristics and geological significance of Permian Maokou Formation in eastern Sichuan Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2021, 26(4): 357-366.
- [13] 杨柳, 臧殿光, 徐宝亮, 等. 川东北开江地区茅口组凹陷异常体分布特征及成因[J]. 新疆石油地质, 2020, 41(5): 542-549.
YANG Liu, ZANG Dianguang, XU Baoliang, et al. Distribution and genesis of abnormal bodies in Maokouzu Sag in Kaijiang area, northeastern Sichuan Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2020, 41(5): 542-549.
- [14] 姚倩颖, 刘一锋, 江青春, 等. 川北一川东地区中二叠世晚期地层划分新认识及地质意义[J]. 石油实验地质, 2021, 43(2): 276-287.
YAO Qianying, LIU Yifeng, JIANG Qingchun, et al. Geological significance of late Mid-Permian stratigraphy in northern and eastern Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2021, 43(2): 276-287.
- [15] DENG Li, YANG Jun, YAN Quanren, et al. Rifting of the Upper

- Yangtze carbonate platform: Insight from Middle Permian carbonate olistostromes in the NE Sichuan basin, SW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2024, 260: 105973.
- [16] XIAO Di, HUANG Tianhai, XU Qiang, et al. Two pulsed activities of the Emeishan large igneous province in southwestern China inferred from dolomite U-Pb geochronology and significance [J]. *GSA Bulletin*, 2024, 136(9/10): 3977-3992.
- [17] XU Fabo, LI Li, LUO Nina, et al. Distribution and genesis of the Maokou Formation dolomite in Fengdu-Shizhu area, eastern Sichuan Basin[J]. *Energy Exploration and Exploitation*, 2024, 42(3): 1098-1114.
- [18] 张涛, 林娟华, 韩月卿, 等. 四川盆地东部中二叠统茅口组热液白云岩发育模式及对储层的改造[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(1): 132-143, 200.
- ZHANG Tao, LIN Juanhua, HAN Yueqing, et al. Pattern of hydrothermal dolomitization in the Middle Permian Maokou Formation, eastern Sichuan Basin, and its alteration on reservoirs herein[J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(1): 132-143, 200.
- [19] 胡东风, 王良军, 黄仁春, 等. 四川盆地东部地区中二叠统茅口组白云岩储层特征及其主控因素[J]. *天然气工业*, 2019, 39(6): 13-21.
- HU Dongfeng, WANG Liangjun, HUANG Renchun, et al. Characteristics and main controlling factors of the Middle Permian Maokou dolomite reservoirs in the eastern Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2019, 39(6): 13-21.
- [20] 翟常博, 林良彪, 尤东华, 等. 川西南地区中二叠统茅口组一段沉积微相特征及有机质富集模式[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(2): 440-456.
- ZHAI Changbo, LIN Liangbiao, YOU Donghua, et al. Sedimentary microfacies characteristics and organic matter enrichment pattern of the 1st member of the Middle Permian Maokou Formation, southwestern Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(2): 440-456.
- [21] 刘飞龙, 付敬浩, 张兆芳, 等. 川西—蜀南地区基底断裂特征及与二叠系火山岩关系[J]. *天然气地球科学*, 2023, 34(6): 1006-1017.
- LIU Feilong, FU Jinghao, ZHANG Zhaofang, et al. Characteristics of basement faults and their relationship with Permian volcanic rocks in western Sichuan-Shunan regions [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 34(6): 1006-1017.
- [22] 韩月卿, 张军涛, 潘磊, 等. 川东南中二叠统茅口组白云岩特征与成因机理[J]. *地学前缘*, 2023, 30(6): 45-56.
- HAN Yueqing, ZHANG Juntao, PAN Lei, et al. Characteristics and formation mechanisms of dolomites in the Middle Permian Maokou Formation in southeastern Sichuan Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2023, 30(6): 45-56.
- [23] LIU Xiaoyu, QIU Nansheng, SØAGER N, et al. Geochemistry of Late Permian basalts from boreholes in the Sichuan Basin, SW China: Implications for an extension of the Emeishan large igneous province[J]. *Chemical Geology*, 2022, 588: 120636.
- [24] 张廷山, 陈晓慧, 刘治成, 等. 峨眉地幔柱构造对四川盆地栖霞期沉积格局的影响[J]. *地质学报*, 2011, 85(8): 1251-1264.
- ZHANG Tingshan, CHEN Xiaohui, LIU Zhicheng, et al. Effect of Emeishan mantle plume over the sedimentary pattern of Mid-Permian Xixia period in Sichuan Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(8): 1251-1264.
- [25] 王海真, 池英柳, 赵宗举, 等. 四川盆地栖霞组岩溶储层及勘探选区[J]. *石油学报*, 2013, 34(5): 833-842.
- WANG Haizhen, CHI Yingliu, ZHAO Zongju, et al. Karst reservoirs developed in the Middle Permian Qixia Formation of Sichuan Basin and selection of exploration regions [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(5): 833-842.
- [26] 厚刚福, 周进高, 谷明峰, 等. 四川盆地中二叠统栖霞组、茅口组岩相古地理及勘探方向[J]. *海相油气地质*, 2017, 22(1): 25-31.
- HOU Gangfu, ZHOU Jingao, GU Mingfeng, et al. Lithofacies paleogeography and exploration realms of Middle Permian Qixia Formation and Maokou Formation, Sichuan Basin [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2017, 22(1): 25-31.
- [27] 杨威, 李德江, 魏国齐, 等. 四川盆地东部上石炭统黄龙组规模储层形成主控因素与发育模式[J]. *天然气工业*, 2024, 44(2): 40-51.
- YANG Wei, LI Dejiang, WEI Guoqi, et al. Formation controlling factors and development patterns of large-scale reservoirs in Carboniferous Huanglong Formation of eastern Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2024, 44(2): 40-51.
- [28] 武思琴, 颜佳新, 刘柯, 等. 黔西南二叠纪早期陆源碎屑沉积体系对冈瓦纳冰川发育的响应[J]. *地学前缘*, 2016, 23(6): 299-311.
- WU Siqin, YAN Jiaxin, LIU Ke, et al. Response of early Permian siliciclastic depositional system to the advance of Gondwana glaciation in southwestern Guizhou [J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(6): 299-311.
- [29] 李凌, 张照坤, 李明隆, 等. 四川盆地威远—高石梯地区二叠系栖霞阶层序地层特征及有利储层分布[J]. *岩性油气藏*, 2022, 34(6): 32-46.
- LI Ling, ZHANG Zhaokun, LI Minglong, et al. Sequence stratigraphic characteristics and favorable reservoirs distribution of Permian Qixia Stage in Weiyuan-Gaoshiti area, Sichuan Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2022, 34(6): 32-46.
- [30] 苏成鹏, 谭秀成, 王小芳, 等. 四川盆地东部中二叠统茅口组眼球状石灰岩储层特征及成因[J]. *海相油气地质*, 2020, 25(1): 55-62.
- SU Chengpeng, TAN Xiucheng, WANG Xiaofang, et al. Characteristics of eyeball-shaped limestone reservoir and its genesis of the Middle Permian Maokou Formation in East Sichuan Basin [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2020, 25(1): 55-62.
- [31] 张赫驿, 杨帅, 张玺华, 等. 川东地区中二叠统茅口组沉积微相与环境演变——以重庆市武隆区羊角剖面为例[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(2): 457-470.
- ZHANG Heyi, YANG Shuai, ZHANG Xihua, et al. Sedimentary microfacies and environmental evolution of the Middle Permian

- Maokou Formation in the eastern Sichuan Basin: A case study of the Yangjiao section in Wulong District, Chongqing, China [J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(2): 457-470.
- [32] 张玺华, 陈聪, 黄婕, 等. 四川盆地中二叠世广元-巴中拉张槽的发现及其油气地质意义[J]. *中国石油勘探*, 2019, 24(4): 466-475.
- ZHANG Xihua, CHEN Cong, HUANG Jie, et al. The discovery of Middle Permian Guangyuan-Bazhong extensional trough in the Sichuan Basin and its petroleum geological significance [J]. *China Petroleum Exploration*, 2019, 24(4): 466-475.
- [33] 张玺华, 陈聪, 张亚, 等. 川西北地区茅口组海槽相地质特征及其油气地质意义[J]. *天然气勘探与开发*, 2018, 41(3): 42-50.
- ZHANG Xihua, CHEN Cong, ZHANG Ya, et al. Geological characteristics of trough facies, Maokou Formation, northwestern Sichuan Basin: Implications for geology [J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2018, 41(3): 42-50.
- [34] 邱威挺, 古鸿信. 试论川东北地区下二叠统孤峰组燧石(硅质岩)的沉积环境[J]. *沉积与特提斯地质*, 1991, 12(6): 1-8.
- QIU Weiting, GU Hongxin. Sedimentary environments of the chert (siliceous rocks) from the Lower Permian Gufeng Formation in northeastern Sichuan [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 1991, 12(6): 1-8.
- [35] 何仕鹏, 袁浩森, 庞森, 等. 双鱼石-河湾场构造带茅口组分层探讨[J]. *石油工业技术监督*, 2020, 36(11): 36-39.
- HE Shipeng, YUAN Haosen, PANG Miao, et al. Discussion on stratigraphic division of Maokou Formation in Shuangyushi-Hewanchang structural belt [J]. *Technology Supervision in Petroleum Industry*, 2020, 36(11): 36-39.
- [36] 印长海, 师江波, 谭秀成, 等. 四川盆地中部合川-潼南地区茅二下亚段白云岩储层特征及成储机制[J]. *海相油气地质*, 2024, 29(2): 136-146.
- YIN Changhai, SHI Jiangbo, TAN Xiucheng, et al. Characteristics and formation mechanism of dolomite reservoirs in the lower submember of Maokou Member 2 in Hechuan-Tongnan area, central Sichuan Basin [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2024, 29(2): 136-146.
- [37] 刘效妤. 四川盆地二叠纪峨眉山玄武岩热效应研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2022.
- LIU Xiaoyu. Thermal effect of the Emeishan basalts on the Sichuan Basin [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2022.
- [38] 沈树忠, 张华, 张以春, 等. 中国二叠纪综合地层和时间框架[J]. *中国科学: 地球科学*, 2019, 49(1): 160-193.
- SHEN Shuzhong, ZHANG Hua, ZHANG Yichun, et al. Permian integrative stratigraphy and timescale of China [J]. *Science China Earth Sciences*, 2019, 49(1): 160-193.
- [39] 刘树根, 文龙, 宋金民, 等. 四川盆地中二叠统构造-沉积分异与油气勘探[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2022, 49(4): 385-413.
- LIU Shugen, WEN Long, SONG Jinmin, et al. Sedimentary topography and tectonic differentiation on the Middle Permian platform and hydrocarbon exploration in Sichuan Basin, SW China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2022, 49(4): 385-413.
- [40] SONG Huyue, ALGEO T J, SONG Haijun, et al. Global oceanic anoxia linked with the Capitanian (Middle Permian) marine mass extinction [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2023, 610: 118128.
- [41] 梁欣阳, 付德奎, 张宁, 等. 川东北普光地区下三叠统飞仙关组岩溶段的地质意义[J]. *地质科技通报*, 2022, 41(5): 386-394.
- LIANG Xinyang, FU Dekui, ZHANG Ning, et al. Geological significance of karst section of Lower Triassic Feixianguan Formation in Puguang area, northeast Sichuan [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2022, 41(5): 386-394.
- [42] 赵小辉, 梁虹, 贺川航, 等. 基于高精度构造解释的滩相白云岩储层预测——以四川盆地龙女寺-合川地区茅口组为例[J]. *天然气勘探与开发*, 2023, 46(4): 91-98.
- ZHAO Xiaohui, LIANG Hong, HE Chuanhang, et al. Prediction of shoal facies dolomite reservoirs based on structural interpretation with high precision: An example from Maokou Formation, Longnvsi-Hechuan area, Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2023, 46(4): 91-98.
- [43] 孟宪武, 陈安清, 李雯, 等. 四川盆地南缘二叠系茅口组构造-沉积分异及控储效应[J/OL]. *成都理工大学学报(自然科学版)*: 1-16 [2024-04-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1634.N.20240305.1018.002.html>.
- MENG Xianwu, CHEN Anqing, LI Wen, et al. Platform margin tectono-sedimentary differentiation and reservoir control effects of the Permian Maokou Formation, southern margin of Sichuan Basin [J/OL]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*: 1-16: 1-16 [2024-04-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1634.N.20240305.1018.002.html>.
- [44] 赵俊兴, 陈洪德, 时志强. 古地貌恢复技术方法及其研究意义——以鄂尔多斯盆地侏罗纪沉积前古地貌研究为例[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2001, 28(3): 260-266.
- ZHAO Junxing, CHEN Hongde, SHI Zhiqiang. The way and implications of rebuilding palaeogeomorphology [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2001, 28(3): 260-266.
- [45] 徐平生, 唐松, 孙超国, 等. 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[J]. *天然气勘探与开发*, 2023, 46(4): 35-46.
- XU Pingsheng, TANG Song, SUN Chaoguo, et al. Development characteristics and paleogeomorphology restoration of karsts in Middle Permian Maokou Formation, Gaoshiti-Moxi area, central Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2023, 46(4): 35-46.
- [46] 李明隆, 谭秀成, 罗冰, 等. 四川盆地西北部中二叠统栖霞组相控早期高频暴露岩溶特征及启示[J]. *中国石油勘探*, 2020, 25(3): 66-82.
- LI Minglong, TAN Xiucheng, LUO Bing, et al. Characteristics of facies-controlled and early high-frequency exposed karstification in

- the Qixia Formation of Middle Permian in the northwest of Sichuan Basin and its significance [J]. *China Petroleum Exploration*, 2020, 25(3): 66–82.
- [47] 李祥. 川东地区二叠系茅口组沉积相及储层特征研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.
- LI Xiang. Sedimentary facies and reservoir characteristics of Permian Maokou Formation in east region of Sichuan [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020.
- [48] 徐诗雨, 夏茂龙, 祝怡, 等. 开江—梁平海槽演化阶段与构造沉积特征[J]. *断块油气田*, 2023, 30(6): 963–974.
- XU Shiyu, XIA Maolong, ZHU Yi, et al. Evolution stage and tectonic sedimentary characteristics of the Kaijiang-Liangping trough[J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2023, 30(6): 963–974.
- [49] 何斌, 徐义刚, 肖龙, 等. 峨眉山大火成岩省的形成机制及空间展布: 来自沉积地层学的新证据[J]. *地质学报*, 2003, 77(2): 194–202.
- HE Bin, XU Yigang, XIAO Long, et al. Generation and spatial distribution of the Emeishan large igneous province: New evidence from stratigraphic records [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2003, 77(2): 194–202.
- [50] 徐义刚, 钟玉婷, 位苟, 等. 二叠纪地幔柱与地表系统演变[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2017, 36(3): 358–373, 358.
- XU Yigang, ZHONG Yuting, WEI Xun, et al. Permian mantle plumes and earth's surface system evolution [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2017, 36(3): 358–373, 358.
- [51] LIU Yiduo, LI Lun, VAN WIJK J, et al. Surface-wave tomography of the Emeishan large igneous province (China): Magma storage system, hidden hotspot track, and its impact on the Capitanian mass extinction [J]. *Geology*, 2021, 49(9): 1032–1037.
- [52] 张宏辉, 杨朝, 李致伟, 等. 乌蒙山地区茅口组中上部火山物质的发现: 峨眉地幔柱早期活动的证据[J]. *地质通报*, 2024, 43(7): 1207–1220.
- ZHANG Honghui, YANG Chao, LI Zhiwei, et al. Discovery of volcanic matter in the Upper Maokou Formation of the Wumengshan area: Evidence of early activity of the Emeishan mantle plume [J]. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(7): 1207–1220.
- [53] VAIL P R, MITCHUM R M, Jr, TODD R G, et al. Seismic stratigraphy and global changes of sea level [M]//PAYTON C E. *Seismic Stratigraphy—Applications to Hydrocarbon Exploration*. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1977: 49–212.
- [54] 王颖, 王英民, 王晓洲, 等. 松辽盆地西部坡折带的成因演化及其对地层分布模式的控制作用[J]. *沉积学报*, 2005, 23(3): 498–506.
- WANG Ying, WANG Yingmin, WANG Xiaozhou, et al. The origin and evolution of slope break belt and its effect on stratigraphy distribution in large down-warped lake basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2005, 23(3): 498–506.
- [55] 彭军, 刘芳兰, 张连进, 等. 川中龙女寺地区中二叠统茅口组储层特征及其主控因素[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(5): 1337–1354.
- PENG Jun, LIU Fanglan, ZHANG Lianjin, et al. Characteristics and main controlling factors of reservoirs in the Middle Permian Maokou Formation, Longnusi area, central Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(5): 1337–1354.
- [56] 山述娇, 陈聪, 张玺华, 等. 川中地区中二叠统茅口组白云岩储层特征及发育主控因素[J]. *天然气勘探与开发*, 2023, 46(4): 27–34.
- SHAN Shujiao, CHEN Cong, ZHANG Xihua, et al. Dolomite reservoirs of the Middle Permian Maokou Formation, central Sichuan Basin: Characteristics and main influential factors [J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2023, 46(4): 27–34.
- [57] 张自力, 乔艳萍, 豆霜, 等. 四川盆地蓬莱气区震旦系灯影组二段岩溶古地貌与控储模式[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(1): 200–214.
- ZHANG Zili, QIAO Yanping, DOU Shuang, et al. Karst paleogeomorphology and reservoir control model of the 2nd member of Dengying Formation in Penglai gas area, Sichuan Basin, China [J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(1): 200–214.
- [58] LI Yanjun, XU Fabo, ZENG Liyuan, et al. Gas source in Lower Permian Maokou Formation and gas accumulation in the syncline area of eastern Sichuan Basin [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 206: 109044.
- [59] 付小东, 陈娅娜, 罗冰, 等. 四川盆地北部中二叠统茅口组孤峰段优质烃源岩特征及其油气地质意义[J]. *地质学报*, 2021, 95(6): 1903–1920.
- FU Xiaodong, CHEN Yana, LUO Bing, et al. Characteristics and petroleum geological significance of the high-quality source rocks in the Gufeng Member of the Middle Permian Maokou Formation in the northern Sichuan Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(6): 1903–1920.
- [60] 包汉勇, 赵帅, 王必金, 等. 川东红星地区二叠系茅口组页岩气勘探突破及富集主控因素[J]. *中国石油勘探*, 2024, 29(1): 65–75.
- BAO Hanyong, ZHAO Shuai, WANG Bijin, et al. Exploration breakthrough and main controlling factors for shale gas enrichment in the Permian Maokou Formation in Hongxing area in eastern Sichuan Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2024, 29(1): 65–75.

(编辑 张玉银)