

川中地区茅口组碳酸盐岩层序地层及沉积相特征*

匡明志^{1,2} 张小兵^{1,2} 袁海锋^{1,2} 陈 聪³ 张玺华³
彭瀚霖³ 徐 婷^{1,2} 肖钦仁^{1,2} 李天军³ 山述娇³

1 成都理工大学能源学院, 四川成都 610059

2 成都理工大学油气藏地质及开发工程全国重点实验室, 四川成都 610059

3 中国石油西南油气田分公司勘探开发研究院, 四川成都 610041

摘 要 四川盆地二叠系茅口组碳酸盐岩是油气勘探的重要层位, 川中八角场—磨溪—龙女寺地区茅二段目前已获得勘探突破, 但因其层序地层结构尚不明确, 制约了茅口组沉积演化研究与储集层预测。本研究基于川中广安华蓥山二崖剖面茅口组高精度岩相特征, 结合实际钻井资料, 开展茅口组沉积相和层序地层格架分析, 并解释层序格架对储集层发育特征和分布规律的控制作用。研究结果表明: (1) 川中地区茅口组碳酸盐岩可分为 8 类岩石微相, 在茅口组沉积中晚期, 构造作用驱动茅口组由缓坡沉积体系向“台地—台内海槽”沉积体系转换。(2) 栖霞组上部层序界面 SB1 和茅二下亚段上部层序界面 SB2 均为 II 型岩相转换界面, 茅二上亚段顶界面 SB3 为 I 型淹没不整合界面, 茅三段顶界面 SB4 为 I 型剥蚀不整合面。(3) 二崖剖面茅口组可划分为 3 个三级层序、5 个四级层序: 茅一段构成三级层序 SQ1 的海侵体系域; 茅二下亚段中—下部对应三级层序 SQ1 的高位体系域, 而上部发育三级层序 SQ2 陆架边缘体系域; 茅二上亚段和茅三段分别对应三级层序 SQ2 和 SQ3。(4) 磨溪—龙女寺地区茅二下亚段云化储集层分布在三级层序 SQ1 高位体系域和三级层序 SQ2 陆架边缘体系域, 分别以准同生晚期和准同生早期云化作用为主, 受控于 II 型层序界面 SB2; 广安—八角场地区茅二上亚段台缘准相白云岩储集层分布在三级层序 SQ2 高位体系域并且受控于 I 型层序界面 SB3, 经历了准同生早期基质云化—准同生晚期颗粒溶蚀—埋藏期云化作用阶段。该研究为四川盆地茅口组白云岩储集层分布规律的预测和成因研究提供了层序和沉积约束, 对茅口组的油气勘探具有一定的参考意义。

关键词 碳酸盐岩 微相分析 层序划分 储集层分布 中二叠统 四川盆地**第一作者简介** 匡明志, 男, 1994 年生, 博士研究生, 主要研究方向为层序地层学与储层地质学。E-mail: kuangmingzhi@stu.cdut.edu.cn。**通讯作者简介** 张小兵, 男, 1978 年生, 副教授, 主要研究方向为储层地质学及构造地质学。E-mail: zhangxiaobing07@cdut.edu.cn。

中图分类号: P539.2 文献标志码: A

Sequence stratigraphy and sedimentary facies characteristics of the Maokou Formation carbonate rocks in central Sichuan Basin

KUANG Mingzhi^{1,2} ZHANG Xiaobing^{1,2} YUAN Haifeng^{1,2} CHEN Cong³ ZHANG Xihua³
PENG Hanlin³ XU Ting^{1,2} XIAO Qinren^{1,2} LI Tianjun³ SHAN Shujiao³

* 国家自然科学基金面上项目 (编号: 41872130) 和四川省自然科学基金青年基金项目 (编号: 2023NSFSC0759) 共同资助。[Co-funded by the National Natural Science Foundation of China (No. 41872130), and the Natural Science Foundation of Sichuan Province (No. 2023NSFSC0759)]

收稿日期: 2023-11-16 改回日期: 2024-04-30

1 College of Energy, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

2 State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

3 Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Chengdu 610041, China

Abstract The carbonate rocks of the Permian Maokou Formation in the Sichuan Basin are crucial for oil and gas exploration. Significant breakthroughs have been achieved in the exploration of the Maokou Formation in the Bajiaochang-Moxi-Longnüsi area of central Sichuan Basin. However, the unclear stratigraphic structure impedes the study of sedimentary evolution and reservoir prediction of the Maokou Formation. This research is based on high-precision lithofacies characteristics of the Maokou Formation at the Er'ya section in the Huaying Mountain of Guang'an in central Sichuan Basin. It integrates actual drilling data to analyze the sedimentary facies and sequence stratigraphic framework of the Maokou Formation, explaining the influence of the sequence framework on the development characteristics and distribution patterns of the reservoirs. The research findings indicate that: (1) The carbonate rocks of the Maokou Formation in the central Sichuan Basin can be divided into eight lithofacies. During the late stage of deposition of the Maokou Formation, tectonic activity facilitated the transition from a gentle slope sedimentary system to a "platform-platform interior sea trough" sedimentary system. (2) The upper sequence interface SB1 of the Qixia Formation and the upper sequence interface SB2 of the lower submember of Member 2 of the Maokou Formation are both classified as type II lithofacies transition interfaces. The top interface SB3 of the upper submember of Member 2 of the Maokou Formation is identified as a type I drowning unconformity interface, while the top interface SB4 of Member 3 of the Maokou Formation is classified as a type I erosion unconformity interface. (3) The Maokou Formation in the Er'ya section can be divided into three third-order sequences and five fourth-order sequences. Member 1 of the Maokou Formation constitutes the transgressive system tract of third-order sequence SQ1. The middle to lower parts of the lower submember of Member 2 correspond to the high-position system tract of third-order sequence SQ1, while the upper part develops the transgressive system tract of third-order sequence SQ2 at the margin of the continental shelf. The upper submember of Member 2 and Member 3 of the Maokou Formation correspond to third-order sequences SQ2 and SQ3, respectively. (4) In the Moxi-Longnüsi area, the dolomitized reservoirs of the lower submember of Member 2 of the Maokou Formation are distributed in the high-position system tract of third-order sequence SQ1 and the continental shelf margin system tract of third-order sequence SQ2. These reservoirs are primarily dominated by late diagenetic dolomitization and early diagenetic dolomitization, controlled by type II sequence boundary SB2. In the Guang'an-Bajiaochang area, the dolomite reservoirs of the upper submember of Member 2 of the Maokou Formation in the platform margin shoal facies are found in the high-position system tract of third-order sequence SQ2 and are controlled by type I sequence boundary SB3. These reservoirs undergo stages of early diagenetic matrix dolomitization, late diagenetic grain dissolution, and burial dolomitization. This study provides constraints on sequence and sedimentation for predicting the distribution patterns and investigating the genesis of dolomite reservoirs in the Maokou Formation in the Sichuan Basin, which is significant for oil and gas exploration in the Maokou Formation.

Key words carbonate rock, microfacies analysis, sequence division, reservoir distribution, Middle Permian, Sichuan Basin

About the first author KUANG Mingzhi, born in 1994, Ph.D. degree candidate, is engaged in researches on sequence stratigraphy and reservoir geology. E-mail: kuangmingzhi@stu.cdut.edu.cn.

About the corresponding author ZHANG Xiaobing, born in 1978, an associate professor, is engaged in researches on reservoir geology and structural geology. E-mail: zhangxiaobing07@cdut.edu.cn.

四川盆地茅口组对应于中二叠统瓜德鲁普统 (Guadalupian) (Jin *et al.*, 1999; Shen *et al.*, 2020), 为一套稳定沉积的碳酸盐岩。近年来, 四川盆地茅口组碳酸盐岩油气勘探陆续获得重大突破, 在磨溪—龙女寺地区、八角场地区的滩相白云岩储集层中相继获得高产工业气流。然而, 当前对茅口组的层序地层缺乏较为精细的刻画, 制约了对滩相储集层发育时序关系和沉积演化过程的认识, 从而增加了该地区油气勘探的难度。

对二叠纪—三叠纪海平面恢复的研究成果显示, 二叠纪为一个二级海退旋回 (Transpecos 超旋回) (Ross and Ross, 1987)。瓜德鲁普统底部为二叠纪最大海侵的开始 (覃建雄等, 1998; Shen *et al.*, 2020), 瓜德鲁普世晚期发生海退 (Ross and Ross, 1987; Haq *et al.*, 1988)。在扬子地区, 研究初期曾将茅口组作为一个二级层序 (殷鸿福, 1994a; Jin *et al.*, 1994), 或与栖霞组一并组成一个二级层序 (梅仕龙等, 1999)。殷鸿福等 (1994b) 和覃建雄等 (1998) 构建的晚二叠世—中三叠世扬子克拉通海平面变化曲线指出, 构造运动导致扬子克拉通二级海平面旋回不同于全球海平面变化趋势, 其具有特提斯域特征。随着勘探资料的不断补充, 茅口组层序划分方案在前人的二级旋回基础上逐渐趋向于三级层序。但三级层序划分方案尚不统一: 覃建雄等 (1998) 将扬子克拉通西南的右江盆地罗德阶—沃德阶 (Roadian-Wordian) 划为 1 个三级层序 (S4), 卡匹敦阶 (Capitanian) 划分为 2 个三级层序 (S5-S6); 梅仕龙等 (1999) 基于贵州来宾铁桥剖面和罗甸剖面的牙形刺演化将罗德阶划分为 1 个三级层序, 将沃德阶—卡匹敦阶划分为 2 个三级层序, 该方案奠定了后续茅口组三级层序的研究基础 (Wignall *et al.*, 2009; Qiu *et al.*, 2014; Meng *et al.*, 2023)。除此之外, 胡明毅等 (2012) 为了突出层序界面对碳酸盐岩储集层的控制, 识别出局部不整合、淹没不整合和暴露不整合 3 类层序界面; 杨帅等 (2021) 提出了 3 个三级层序分别对应茅口组沉积格局转化的 3 个阶段; 邱振等 (2024) 重点关注川北硅质岩的对比关系, 将川北茅口组的灰岩划分为 2 个三级层序, 而硅质岩单独作为 1 个三级层序。尽管当前的三级层序划分方案推动了对扬子地区茅口期岩相古地理的认识, 但其岩石地层单位划分标准、层序结构方

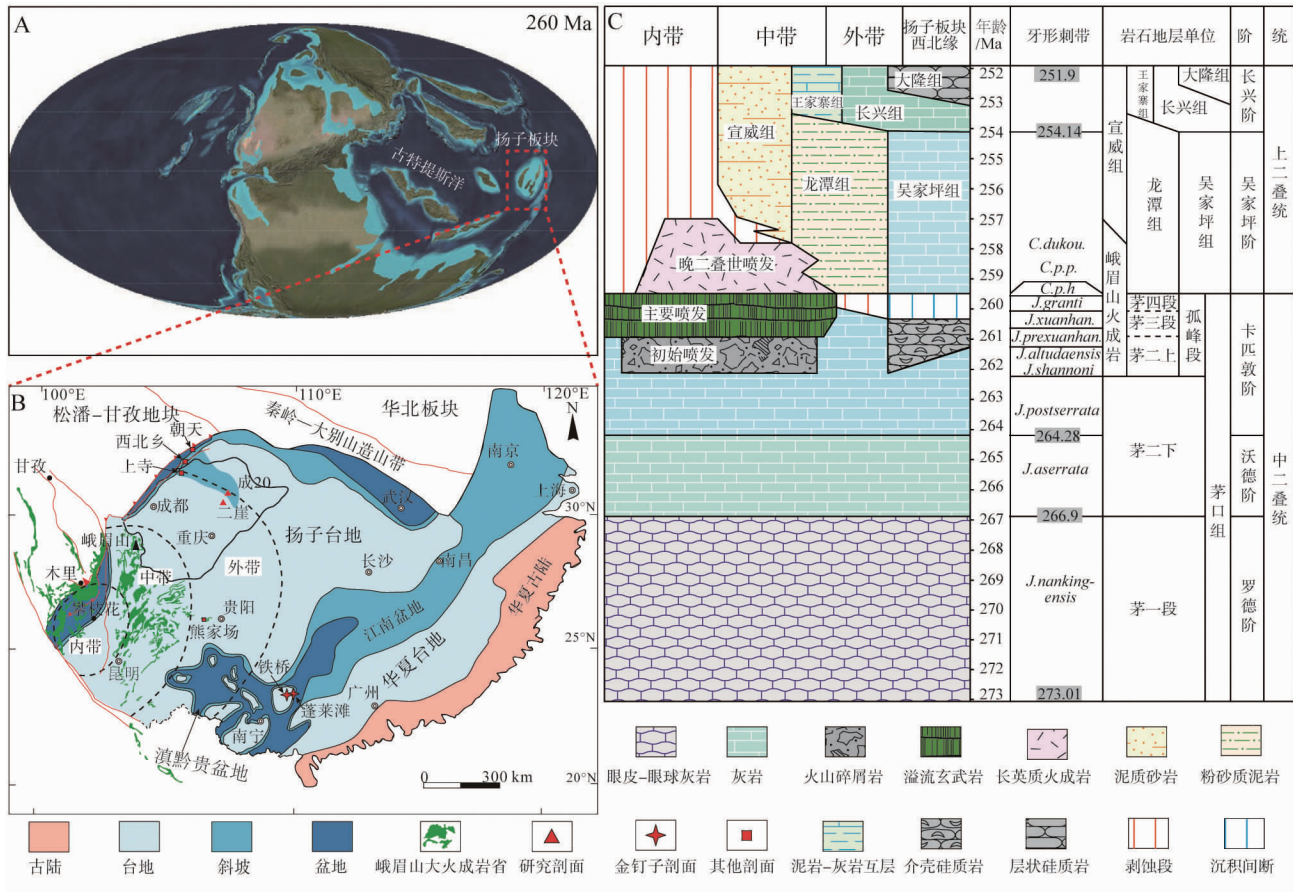
案、层序界面性质和特征均难以形成较为一致的认识。

本研究以广安华蓥山二崖剖面茅口组为研究对象, 开展了详细的岩相划分和层序结构剖析, 结合盆内钻井资料, 搭建了茅口组层序地层格架, 讨论了层序格架对沉积相带和储集层发育特征及分布规律的控制作用, 以期对川中地区茅口组的沉积演化与储层预测提供借鉴。

1 区域地质概况

扬子板块在二叠纪位于赤道附近, 是一个将古特提斯洋和泛大洋分隔开的孤立板块 (图 1-A) (Ziegler *et al.*, 2003)。受加里东运动和海西运动的影响, 四川盆地古生界不同程度地缺失奥陶系、志留系、泥盆系、石炭系和下二叠统 (何登发等, 2011)。之后, 冈瓦纳大陆冰盖的融化导致早—中二叠世海侵, 四川盆地再次接受沉积, 发育上超于寒武系—石炭系的下二叠统梁山组和栖霞组以及中二叠统茅口组 (Wang and Jin, 2000; 黄涵宇等, 2017)。中二叠世瓜德鲁普统沉积末期, 全球发生大规模海退, 海平面下降至古生代最低位置, 盘古大陆 (Pangea) 暴露, 发育陆相沉积 (Ross and Ross, 1987; Haq *et al.*, 1988; Kofukuda *et al.*, 2014)。该时期, 扬子板块不仅受到中二叠世晚期全球海退事件影响, 还叠加了峨眉山大火成岩省地幔柱隆升作用 (峨眉山裂运动或东吴运动) 影响, 造成中二叠统茅口组顶部地层的区域性缺失, 与上二叠统吴家坪组/龙潭组呈平行不整合接触 (罗志立等, 1988; 何斌等, 2005, 2006; 李旭兵等, 2011)。因此, 扬子板块的瓜德鲁普统既反映全球共性, 又具自身特色。

在早—中二叠世海侵初期, 四川盆地整体呈“西南高, 东北低”的沉积格局, 西南缘康滇古陆、东南缘的雪峰山古隆起为四川盆地提供物源输入, 表现为梁山组滨岸—潮坪与沼泽沉积发育; 而栖霞组碳酸盐岩为海侵规模扩大后的沉积产物, 此时雪峰山古隆起被完全淹没, 从川西南康滇古陆向四周水体逐渐加深, 发育陆表海碳酸盐岩沉积体系 (黄涵宇等, 2017)。中二叠统茅口组为栖霞组沉积基础上再次海侵之后的碳酸盐岩沉积序列 (图 1-B) (覃建雄等, 1998; Wang and Jin, 2000; Shen



A—中二叠世全球板块位置及古地理图（底图来自于 <https://deeptime.com/>）；B—华南板块在中二叠世的岩相古地理格局和二崖剖面及关键钻井位置（据 Wang and Jin, 2000）；C—四川盆地二叠系岩相序列概况（据 Wang et al., 2020; Shen et al., 2020, 有修改）

图 1 四川盆地茅口组区域地质概况

Fig. 1 Regional geologic background map of the Maokou Formation in Sichuan Basin

et al., 2020)。茅口组在四川盆地主体表现为一个向上变浅的二级旋回（殷鸿福，1994a），岩相特征垂向分异明显。川中地区茅口组可划分为3段（图1-C）：茅一段以眼皮眼球状或瘤状生屑泥晶灰岩和泥微晶灰岩为主，伽马值整体较高，根据伽马旋回和对应的岩相组合又可细分为4个亚段；茅二段为泥晶生屑灰岩，局部地区中部和上部分别发育云质灰岩和白云岩沉积序列，伽马值相对较低，根据伽马旋回进一步可分为上、下2个亚段；茅三段底部常为硅质灰岩、泥微晶灰岩，向上逐渐演化为颗粒灰岩，伽马值逐渐降低。峨眉山大火成岩省地幔柱活动和川北洋壳俯冲作用使茅口晚期的华南板块构造分异作用增强（王兴志等，2017），导致在川西南茅口组垂向上由碳酸盐岩向峨眉山玄武岩的变化，并在川北地区发生向硅质岩的横向相变。地幔柱作用造成的隆升和全球海退事件共同导致四

川盆地茅口组的差异性剥蚀作用，使得茅口组地层仅在川东—川南地区发育茅四段高伽马富泥质沉积（Qiu et al., 2014；苏旺等，2015；王兴志等，2017；Su et al., 2020a）。

二崖剖面位于川中华蓑山地区，连续出露栖霞组和茅口组。茅口组宏观岩相旋回和层序界面特征明显，茅一段主要由深灰色眼皮眼球灰岩构成，茅二下亚段以中—厚层泥晶生屑灰岩为主导，茅二上亚段发育巨厚块状白云岩，茅三段沉积浅灰色厚层颗粒灰岩。二崖剖面北侧的成20井在茅口组沉积晚期的构造分异作用下，相变为深水斜坡（图1-B），发育与茅二上亚段至茅三段等时的泥灰岩。因此，二崖剖面与成20井具备跨浅水—深水相带的对比性，有利于茅口组沉积晚期的构造分异和沉积演化研究。

2 岩相及沉积相分析

2.1 岩相分类

碳酸盐岩的岩相特征是层序地层和沉积相序的研究基础，其包含了古气候、古环境、古水深等古环境信息。笔者立足于冯增昭（1982）的分类方案，以碳酸盐岩的组分和结构为焦点，综合野外宏观特征，将川中地区二崖剖面茅口组碳酸盐岩划分为 8 种岩相类型（表 1），分别为层状泥（晶）灰岩（MF1）、含生屑泥灰岩（MF2）、透镜状生屑泥晶灰岩（MF3）、层状生屑泥晶灰岩（MF4）、层状泥晶生屑灰岩（MF5）、残余生屑云质灰岩（MF6）、残余生屑晶粒云岩（MF7）和内碎屑亮晶灰岩（MF8）。

MF1: 层状泥（晶）灰岩。在二崖剖面茅口组垂向序列上呈分散分布，主要集中在茅一段。该岩相以泥微晶方解石为主，含少量生屑组分（生屑含量低于 5%）（图 2-A, 2-C），偶见保存完好的介形虫和粉屑级生屑，局部位置隐约可见风暴扰动成因的少量似球粒结构。该岩相主要指示低能沉积环境，常见于风暴浪基面以下。

MF2: 含生屑泥（晶）灰岩。该类岩相主要为二崖剖面茅一段下部眼皮灰岩的微观表现。眼皮灰岩在宏观上主要呈灰黑色波状、纹层状，常附着于深灰色眼球灰岩上下，两者呈互层产出，泥质含量相对较高。在显微镜下可见其主要成分为灰泥，其次为微晶方解石，生屑含量 5%~10%，以粉屑级

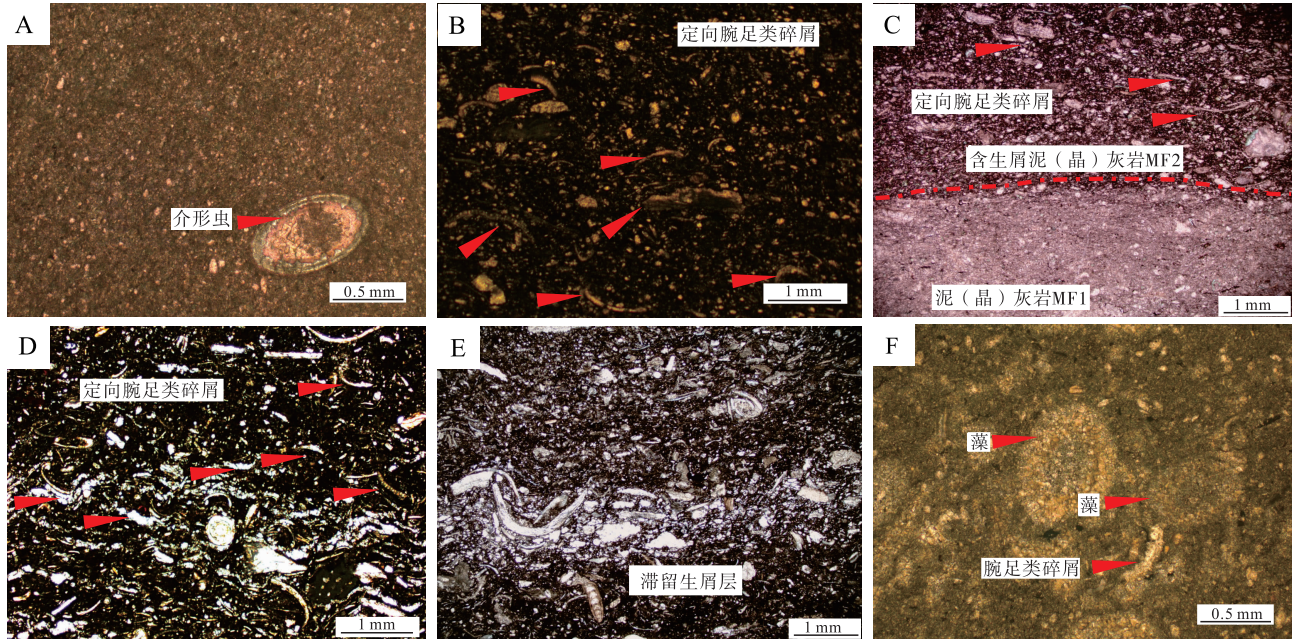
生屑居多，还常见 0.5~1 mm 大小的腕足类壳屑和钙藻碎屑，其中腕足类壳体多呈定向性，为背地型，壳体破损严重（图 2-B 至 2-E）。结合富泥质的基质成分，推测该生屑是晴天浪基面以上强水动力环境下破碎后的生物碎屑搬运至风暴浪基面下的异地异位沉积，并可见风暴浪基面以下的滞留沉积（图 2-E）。

MF3: 透镜状生屑泥晶灰岩。主要为茅一段眼球状灰岩，在川中地区与眼皮状（纹层状）含生屑泥灰岩呈透镜状伴生，组成眼皮—眼球灰岩韵律层。透镜状生屑泥晶灰岩以泥晶为主，生物种类相对单一，常见藻类颗粒，其管壁重结晶改造较为严重，多为方解石多晶粒结构（图 2-F），而藻类为碳酸盐岩沉积环境中重要的自养型生物，营光合作用，常分布于风暴浪基面以上的透光带（Flügel, 2010）。该类岩相组合的成因存在较大的争议，常被解释为沉积成因、后期成岩作用和差异压实等形成（罗进雄等，2019；Su *et al.*, 2020b；韩月卿等，2022）。值得注意的是，眼皮—眼球灰岩围绕川中—蜀南一带呈环带分布特征，且与栖霞组顶部岩溶发育位置具有一定的耦合性，而川北广元旺苍等露头相对欠发育，以瘤状含生屑泥灰岩为主（Su *et al.*, 2020b）。该平面展布特征指示其可能受控于川中古隆起等高地貌，而此类高地貌常伴随中缓坡—外缓坡沉积相转换带。因此，眼皮—眼球灰岩可能仅发育在中缓坡和外缓坡的相带转换位置，即风暴浪基面附近，在风暴浪基面的波动或者季节

表 1 四川盆地二崖剖面茅口组碳酸盐岩岩石微相

Table 1 Carbonate microfacies from the Maokou Formation in Erya section, Sichuan Basin

沉积相	岩石微相	成分描述	宏观特征
外缓坡/陆棚	MF1: 层状泥（晶）灰岩	灰泥和方解石，几乎不含生屑	薄层状
	MF2: 含生屑泥（晶）灰岩	灰泥和方解石；生屑含量 5%~10%，以粉屑居多；见定向腕足类壳体、藻屑	川中地区纹层状眼皮灰岩 川北瘤状、层状
中缓坡/台地	MF3: 透镜状生屑泥晶灰岩	以泥微晶方解石为主，生屑常见腕足类、藻粒	茅一段眼球灰岩
	MF4: 层状生屑泥晶灰岩	以泥微晶方解石为主，生屑相对丰富，但含量低于 10%~25%	眼皮眼球段间的夹层灰岩； 薄—中层灰岩
内缓坡/台地	MF5: 层状泥晶生屑灰岩	生屑含量达 75% 以上，泥晶胶结，生物种类丰富，藻类、有孔虫、腕足类等共生	茅二下亚段中层状
	MF6: 残余生屑云质灰岩	白云石和方解石伴生，白云石环绕灰质生屑颗粒外缘分布	川中茅二下亚段顶部中—厚层状
	MF7: 残余生屑晶粒云岩	半自形的晶粒白云石组成，晶间孔发育，见残余生屑结构	川中茅二上亚段厚层状
	MF8: 内碎屑亮晶灰岩	颗粒组成以内碎屑为主，粒径为 125~250 μm，富含大型蠕类，颗粒之间亮晶胶结	川中茅三段中—厚层状



A—层状泥(晶)灰岩(MF1), $P_2 m-41-3$, 正交偏光, 箭头所指为介形虫; B—含生屑泥(晶)灰岩(MF2), 眼皮灰岩, $P_2 m-48-2$, 单偏光, 箭头所指为定向腕足类碎屑; C—层状泥(晶)灰岩(MF1)与含生屑泥(晶)灰岩(MF2), $P_2 m-44-3$, 单偏光, 箭头所指为定向腕足类碎屑; D—含生屑泥(晶)灰岩(MF2), $P_2 m-54-1$, 眼皮灰岩, 单偏光照片, 富含泥质, 箭头所指为定向腕足类碎屑; E—含生屑泥(晶)灰岩(MF2), 眼皮灰岩, $P_2 m-47-1$, 单偏光, 见风暴浪基面以下的滞留生屑层; F—透镜状生屑泥晶灰岩(MF3), 眼球灰岩, $P_2 m-46-1$, 单偏光, 见藻类和腕足类碎屑

图 2 四川盆地二崖剖面茅口组岩相类型薄片特征

Fig. 2 Characteristics of lithologic microfacies from the Maokou Formation in Erya section, Sichuan Basin

性上升流的影响下, 具备形成眼皮眼球灰岩韵律层的高频旋回水动力条件 (Lei *et al.*, 2024)。

MF4: 层状生屑泥晶灰岩。垂向上常与泥晶生屑灰岩岩相组合出现。生屑含量介于 10%~25% 之间, 发育腕足类、棘皮类等生物碎屑, 生屑破碎程度较高(图 3-A)。生屑具有一定的搬运磨蚀特征, 可能为晴天浪基面之上高强度破碎后的生物碎屑经过分选并搬运至风暴浪基面之上的沉积。该类岩相应指示晴天浪基面以下、风暴浪基面以上的沉积环境。

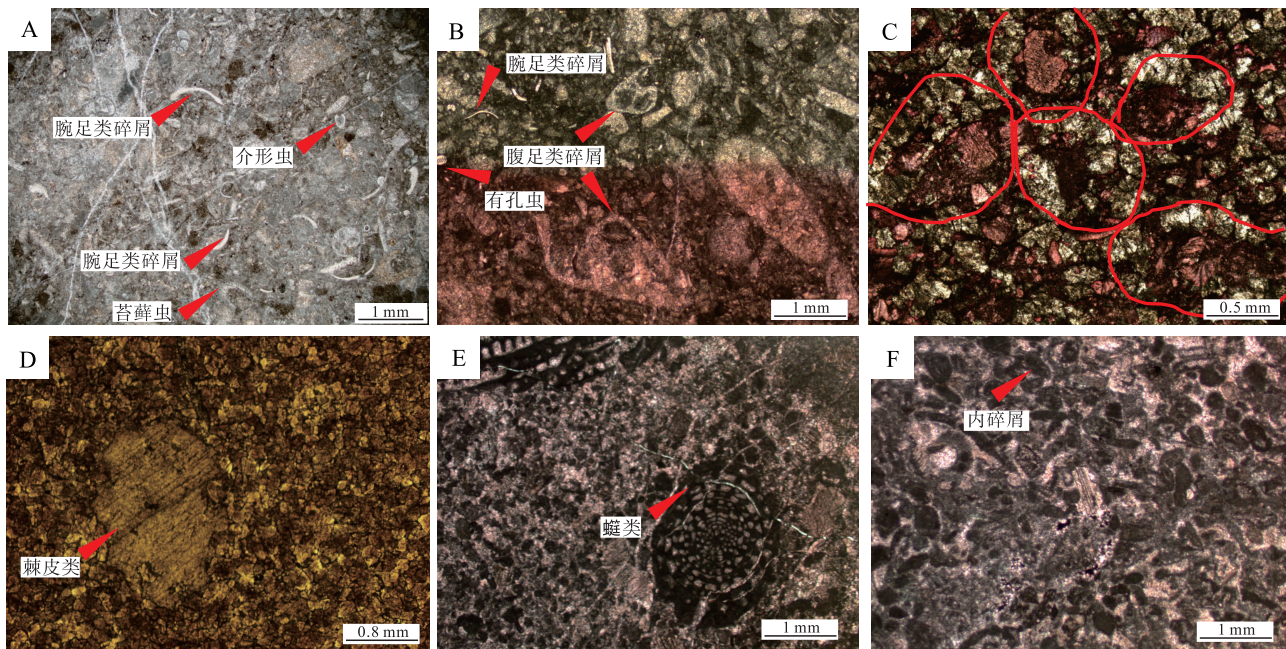
MF5: 层状泥晶生屑灰岩。主要分布在茅二段, 生屑种类和丰度相对茅一段明显增多, 生屑含量高达 75% 以上, 泥晶胶结, 常见藻类、小型有孔虫、腕足类、介形虫、棘皮类、苔藓虫等生物共生(图 3-B)。生物的繁盛指示了富氧、温暖、营养充足的生态环境, 通常对应于晴天浪基面以上的内缓坡或者开阔台地相带。

MF6: 残余生屑云质灰岩。二崖剖面茅二下亚段上部发育一套云质灰岩沉积, 厚度约 10 m, 微

观上表现为白云石和方解石的共存。白云石的分布常环绕灰质生屑颗粒外缘分布, 指示其原岩可能为生屑灰岩, 而后经弱云化改造, 保留了残余颗粒结构, 形成云质灰岩(图 3-C)。该岩相代表了较高能的沉积环境, 通常为晴天浪基面之上的缓坡滩相沉积。

MF7: 残余生屑晶粒云岩。该岩相是二崖剖面茅口组茅二段上部的一套厚层块状晶粒白云岩, 主要由半自形的晶粒白云石组成, 粒径约 100 μm , 晶间孔发育, 显微镜下均可见残余生屑结构(图 3-D)。因此, 该岩相可能是由生屑灰岩经白云石化改造而成, 其通常指示了高能环境下的台地边缘沉积相带。

MF8: 内碎屑亮晶灰岩。主要发育在茅三段, 宏观上为多套中层浅灰色颗粒灰岩, 富含蠕类。微观上, 以似球粒内碎屑为主, 粒径为 125~250 μm , 富含大型蠕类, 颗粒之间亮晶胶结(图 3-E, 3-F), 为典型的高能环境沉积, 多形成于台地边缘相带。Peng 等 (2020) 基于有孔虫形态学, 将



A—层状生屑泥晶灰岩(MF4), P_2 m-60-2, 生屑种类丰富, 含量低于25%; B—层状泥晶生屑灰岩(MF5), P_2 m-88-2, 见腕足类、腹足类、有孔虫等生屑, 单偏光; C—残余生屑云质灰岩(MF6), P_2 m-90-2, 见残余生屑结构, 单偏光; D—残余生屑晶粒云岩(MF7), P_2 m-103-8, 单偏光; E—内碎屑亮晶灰岩(MF8), P_2 m-109-2, 箭头所指为蠕类, 单偏光; F—内碎屑亮晶灰岩(MF8), P_2 m-110-3, 亮晶胶结, 单偏光

图 3 四川盆地二崖剖面茅口组岩相类型薄片照片

Fig. 3 Characteristics of lithologic microfacies from the Maokou Formation in Erya section, Sichuan Basin

该类岩相归因于高能且富营养的浅水沉积。

2.2 沉积相分析

2.2.1 沉积相演化

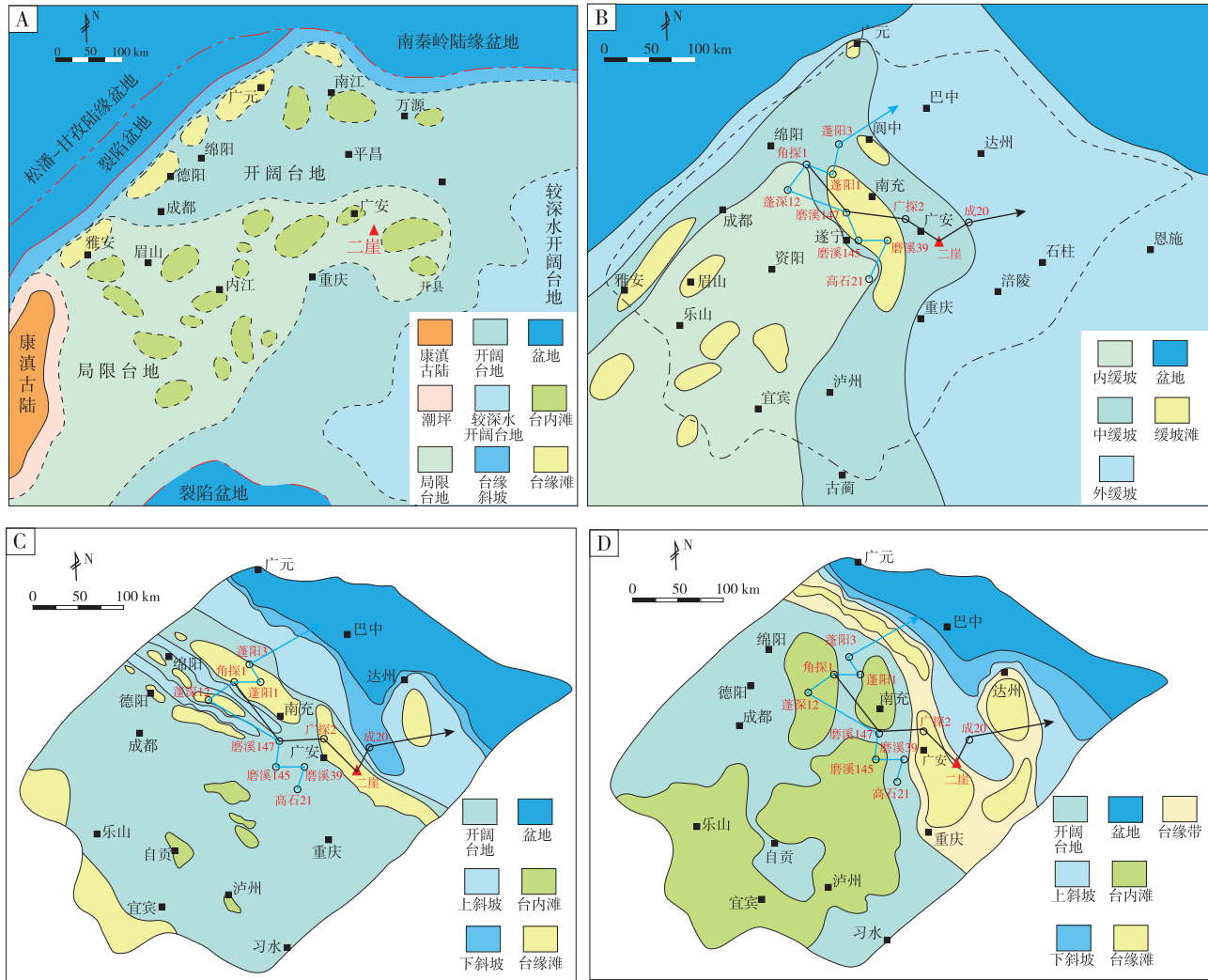
茅口组沉积早期研究区构造活动相对稳定, 其继承了栖霞组沉积格局, 发生栖霞组沉积晚期主体海退背景之后的又一次海侵(覃建雄等, 1998; 何登发等, 2011; Shen *et al.*, 2020)。黄涵宇等(2017)总结了栖霞组的岩相特征, 以局限台地—开阔台地—较深水开阔台地的模式总结了蜀南—川中—川东的栖霞组沉积演化(图 4-A), 该模式类似于碳酸盐岩缓坡模式的内缓坡—中缓坡—外缓坡。茅口组沉积早期为眼皮眼球灰岩, 具有较强的韵律性, 其形成过程很可能是风暴浪基面的频繁波动, 造成中缓坡相和深缓坡相的交替(图 4-B)。茅口组沉积晚期, 由于峨眉山大火成岩省的活动和扬子北缘的洋壳俯冲作用均可能诱发扬子克拉通的拉张作用, 导致川北广元—宣汉地区发育北西西向的台内海槽(王兴志等, 2021)。广元朝天剖面(Lai *et al.*, 2008)与宣汉成 20 井均在茅口组沉积中晚期, 由缓坡相的生屑灰岩突变为深水相的泥

(晶)灰岩、含生屑泥(晶)灰岩沉积。与此同时, 该海槽南侧的广安—八角场地区在茅口组沉积中晚期逐渐形成北西向的台缘滩沉积(杨雨等, 2021; 杨帅等, 2021)。因此, 川中—川北地区在茅口组沉积时期经历了从早期缓坡模式到晚期缓坡型台地沉积体系的演化。

2.2.2 缓坡沉积体系

碳酸盐岩缓坡模式最初是由陆表海的概念发展而来(Ahr, 1973), 基于水动力条件可将缓坡模式划分为内缓坡、中缓坡和外缓坡(Burchette and Wright 1992)。茅口组沉积早期继承了栖霞组沉积末期的缓坡古地貌格局, 发育缓坡沉积体系(图 5-A; 图 6)。层状泥(晶)灰岩(MF1)和含生屑泥(晶)灰岩(MF2)主要形成于外缓坡, 而透镜状生屑泥晶灰岩(MF3)和层状生屑泥晶灰岩(MF4)为中缓坡沉积, 泥晶生屑灰岩(MF5)和残余生屑云质灰岩(MF6)主要是内缓坡的沉积产物(表 1)。

茅一段下部(茅一 1 亚段)以层状泥(晶)灰岩(MF1)和含生屑泥(晶)灰岩(MF2)序列为主, 指示了茅口组早期海侵背景下的外缓坡沉



A—四川盆地栖霞组二亚段沉积相图（据黄涵宇等，2017）；B—四川盆地茅口组早期沉积相图（据苏成鹏等，2021）；C—四川盆地茅二上亚段沉积相图（据杨雨等，2021）；D—四川盆地茅三段沉积相图（据杨雨等，2021）

图 4 四川盆地栖霞组和茅口组沉积相

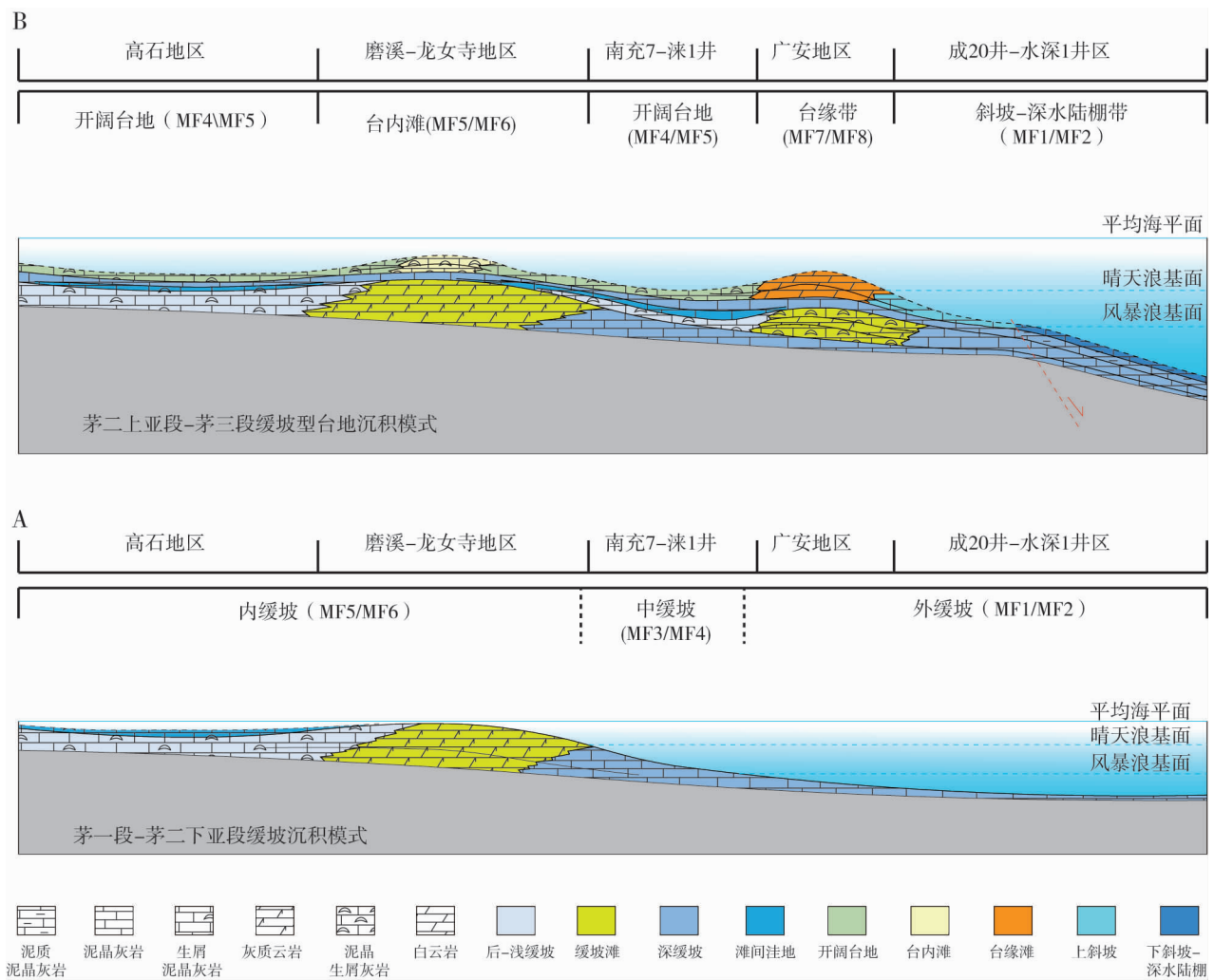
Fig. 4 Sedimentary facies of the Chihhsia and Maokou Formations in Sichuan Basin

积，向上逐渐转换为茅一 2 亚段中缓坡的层状泥晶生屑灰岩 (MF4)。茅一 3 亚段主体岩相序列在宏观上以眼皮—眼球状灰岩为主，主要表现为纹层状含生屑泥 (晶) 灰岩 (MF2) 和透镜状生屑泥晶灰岩 (MF3) 互层，为外缓坡和中缓坡相带交替变化的结果，这种高频变化可能受季节性上升流的驱动。茅一 4 亚段下部为一套层状泥晶生屑灰岩 (MF4)，向上部过渡为薄层状含生屑泥晶灰岩 (MF2)，指示了中缓坡相向外缓坡相的演化 (图 6)。

茅二下亚段眼皮、眼球特征基本不发育，以层状生屑泥晶灰岩 (MF4) 和层状泥晶生屑灰岩

(MF5) 为主，生物种类丰富，指示了氧气和光照充足的中—内缓坡环境，向上发育一套残余生屑云质灰岩 (MF6) 沉积，为典型的内缓坡滩相沉积。内缓坡残余生屑云质灰岩 (MF6) 之上为一套中缓坡层状生屑泥晶灰岩 (MF4)，指示了又一次海侵事件的开始 (图 6)。

茅二上亚段下部为一套外缓坡层状含生屑泥晶灰岩 (MF2)。通过伽马序列的高精度约束，茅二上亚段中部层状泥晶生屑灰岩 (MF5) 与厚层残余生屑晶粒云岩 (MF7) 岩相组合的底部对应了成 20 井台缘前斜坡—陆棚相泥晶灰岩底部，指示该套残余生屑晶粒云岩可能为构造分异之后的台缘滩



A—川中地区茅口组茅一段—茅二下亚段缓坡沉积模式图；B—川中地区茅口组茅二段缓坡型台地—海槽沉积模式图

图 5 四川盆地茅口组碳酸盐岩沉积演化模式

Fig. 5 Sedimentary evolutionary model of the Maokou Formation carbonate rock in Sichuan Basin

沉积(图 4-C; 图 5-B)。因此, 缓坡沉积体系终止于茅二上亚段中部, 向上逐渐向台地沉积体系演化(图 6)。

2.2.3 台地沉积体系

茅口组沉积晚期的构造分异驱动了扬子克拉通台地沉积体系的发育(图 4-C, 4-D; 图 5-B), 为茅口组滩相沉积提供了古地貌条件, 奠定了油气储集层的发育基础。二崖剖面台地沉积体系主要为缓坡型台地, 发育在茅二上亚段和茅三段, 垂向相序包含开阔台地、台缘滩、台缘斜坡—陆棚3类沉积相(图 5-B; 图 6)。开阔台地沉积发育于茅二上亚段白云岩下部, 以泥晶生屑灰岩(MF5)为主, 为缓坡沉积体系向台地沉积体系转化的过渡阶段沉积; 台缘滩沉积表现为茅二上亚段的浅色厚层块状残余

生屑晶粒云岩(MF7)和茅三段的多套浅灰色中厚层内碎屑亮晶灰岩(MF8)为主, 两者之间以茅三段底部的泥(晶)灰岩(MF1)与含生屑泥灰岩(MF2)分隔, 指示了海侵过程中发育台缘斜坡—陆棚相低能沉积。

3 层序地层分析

3.1 层序界面识别

3.1.1 栖霞组与茅口组界面

对于茅口组层序界面的认识, 因层序结构划分方案的差异也不尽相同。胡明毅等(2012)认为栖霞组与茅口组之间的界面为局部暴露不整合, 茅口组内部层序界面为淹没不整合, 茅口组顶部发育

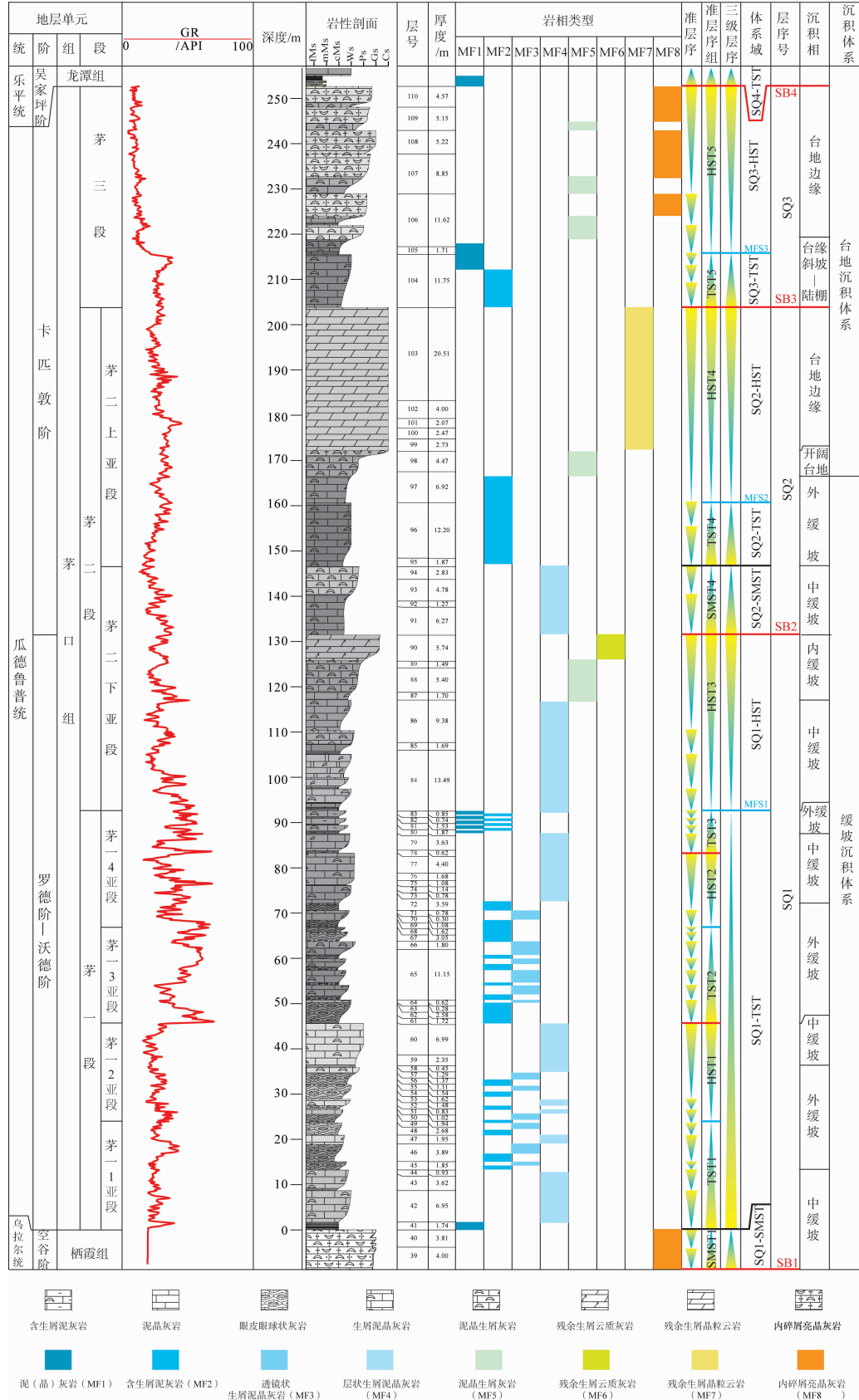


图 6 四川盆地二崖剖面岩相序列与层序结构

Fig. 6 Lithostratigraphy successions and sequence stratigraphy of the Maoku Formation in Erya section, Sichuan Basin

暴露不整合;杨帅等(2021)将栖霞组与茅口组界面、茅口组内部层序界面均定性为岩相转换面,而茅口组顶部为不整合面。因此,栖霞组与茅口组界面和茅口组顶界面为当前研究普遍认可的层序界面,然而本研究基于野外剖面宏观特征、高精度岩相分析以及自然伽马序列,认为栖霞组与茅口组界面为茅口组沉积早期的海侵体系域(SQ1-TST)底界面,界面下部发育弱海侵背景下的陆架边缘体系域(SQ1-SMST),所属三级层序的底界面(SB1)应位于栖霞组内部,为Ⅱ型层序界面。该层序界面SB1在四川盆地主要为岩相转换面,局部为岩溶暴露面。层序界面以下的陆架边缘体系域(SQ1-SMST)在栖霞组顶部表现为稳定分布的自然伽马升高特征。磨溪150井在层序界面(SB1)下方为栖二上亚段岩溶缝洞发育的白云岩,而层序界面(SB1)之上,呈现出亮晶砂屑灰岩向顶部泥质灰岩、硅质灰岩的转换,可能指示了缓慢海侵过程;二崖剖面在栖霞组顶部沉积一套厚层块状亮晶砂屑灰岩向中一薄层亮晶生屑灰岩转化的加积一弱退积序列,指示了栖霞组顶部为缓慢海侵背景下的陆架边缘体系域沉积。随后快速海侵过程开启茅口组的沉积序幕,以茅口组底部稳定分布的8套薄层泥质灰岩和泥晶灰岩互层序列为海侵体系域开始标志(图7-A,7-B)。

3.1.2 茅口组内部层序界面

本研究在二崖剖面茅口组共识别出3个三级层序界面,自下而上分别为茅二下亚段上部界面(SB2)、茅二上亚段顶界面(SB3)、茅口组与龙潭组之间的界面(SB4)(图6;图7)。

层序界面SB2位于茅二下亚段顶界下方约15m处。界面以下为茅二下亚段的泥晶生屑灰岩(MF5)与残余生屑灰质云岩(MF6)组合,指示了内缓坡的滩相沉积;而界面以上为茅二下亚段顶部的一套中缓坡生屑泥晶灰岩(MF4),呈弱退积特征,可能为上覆层序的陆架边缘体系域,向上为茅二上亚段下部快速海侵形成的外缓坡含生屑泥晶灰岩(MF2)。该岩相组合和相序演化均指示了界面以上的低位一海侵过程(图6;图7-A,7-F)。

层序界面SB3位于茅二上亚段顶界面,为淹没不整合面,且为具备台缘坡折的Ⅰ型层序界面(图6;图7-G)。界面以下为台地沉积体系的浅灰色台缘滩相残余生屑晶粒云岩(MF7),界面以上

覆盖一套深灰色薄层泥(晶)灰岩(MF1)与含生屑泥(晶)灰岩(MF2)组合,反映快速海侵淹没台地沉积体系形成的淹没不整合面。

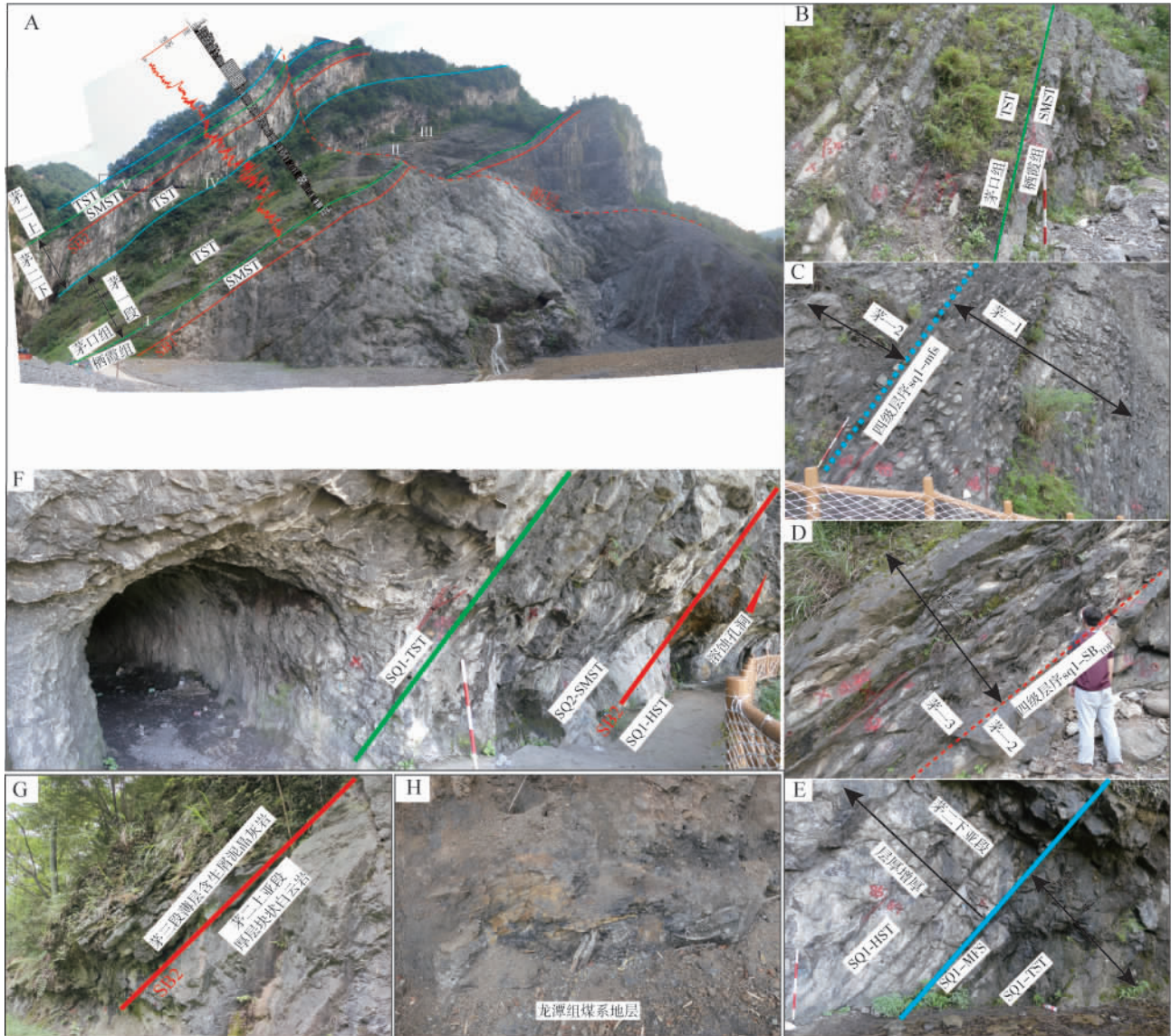
层序界面SB4为茅口组顶界面,为台地沉积体系的Ⅰ型层序界面。瓜德普世末期全球大规模海退叠加扬子地区隆升构造导致茅口组顶部部分地层的剥蚀,形成区域性剥蚀不整合面。界面以下为高位海退背景下形成的浅色中厚层内碎屑亮晶灰岩(MF8),而界面以上为吴家坪阶龙潭组煤系地层,两者呈平行不整合接触(图7-H)。

3.2 层序地层结构

自20世纪70年代至今,层序地层学由Exxon层序地层学逐渐发展衍生出众多体系域分类方案和层序划分模式(Vail, 1977),例如, Hunt和Tucke(1992)的强迫性海退楔体系域(FRWST)和下降阶段体系域(FSST)以及Galloway所提出的R-T层序模式(Vail *et al.*, 1984)。Exxon层序地层学根据层序界面类型划分层序,主要包括Ⅰ型和Ⅱ型层序结构,其中Ⅰ型层序由低位体系域(LST)、海侵体系域(TST)和高位体系域(HST)组成,Ⅱ型层序主要包含陆架边缘体系域(SMST)、海侵体系域(TST)和高位体系域(HST)(Vail, 1977)。该层序划分方案更能强调层序界面类型和其对研究区茅口组储集层的约束,有利于层序地层学和储集层的结合。因此,笔者主要采取Exxon层序模式进行讨论。

在层序界面的宏观约束下,结合岩相组合特征和伽马曲线等资料,开展了二崖剖面茅口组准层序级高精度层序结构分析。在二崖剖面共识别出39个准层序,可对比川中一川北地区的5个四级层序(sq1-sq5)和3个三级层序(SQ1-SQ3)(图6)。

三级层序SQ1是由栖霞组上部层序界面(SB1)和茅二下亚段上部界面(SB2)限定的地层单元,最大海泛面(MFS1)为茅一段顶界面,包括栖霞组顶部的陆架边缘体系域(SQ1-SMST)、茅一段海侵体系域(SQ1-TST)和茅二下亚段高位体系域(SQ1-HST)(图6)。陆架边缘体系域(SQ1-SMST)的特征已在前面详述(见3.1.1节),此处着重介绍海侵体系域与高位体系域。最大海泛面(MFS1)以下岩相组合整体以眼皮一眼球状薄层含生屑泥(晶)灰岩(MF2)、透镜状生



A—二崖剖面茅口组野外宏观照片及层序特征；B—茅口组与栖霞组界面，茅口组底部多套薄层泥晶灰岩和泥灰岩的互层，对应了 A 中的方框 I；C—二崖剖面茅口组茅一 1 亚段顶部的眼皮眼球状灰岩，顶界面对应四级层序 sq1 的最大海泛面；D—二崖剖面茅一 3 亚段底部的泥质纹层泥灰岩，为四级层序 sq2 的初始海泛面；E—茅一段顶部的层状泥晶灰岩，向茅二下亚段底部增厚；F—茅二下亚段顶部的云质灰岩溶蚀孔洞，上覆中—薄层生屑泥晶灰岩，茅二下亚段底部的海侵体系域含生屑泥晶灰岩；G—茅三段底部的薄层含生屑泥晶灰岩覆盖再茅二上亚段厚层块状白云岩之上；H—茅口组顶部龙潭组煤系地层

图 7 四川盆地二崖剖面茅口组层序界面特征

Fig. 7 Characteristics of sequence boundaries of the Maokou Formation in Erya section, Sichuan Basin

屑泥晶灰岩 (MF3) 为主导，局部发育中层状生屑泥晶灰岩 (MF4)，指示中—外缓坡为主要沉积背景的三级海侵体系域 (SQ1-TST)，而最大海泛面 (MFS1) 以上则以早期的外缓坡含生屑泥 (晶) 灰岩 (MF2) 向中缓坡生屑泥晶灰岩 (MF4)、内缓坡泥晶生屑灰岩 (MF5) 演化，为三级层序 SQ1 的高位体系域 (SQ1-HST)。层序界面 SB2 之下发育内缓坡滩相残余生屑云质灰岩 (MF6)，指示了

高位晚期海退控制了滩体的发育(图 6)。

三级层序 SQ1 主要包含了 3 个四级层序 (sq1-sq3)：(1) 四级层序 sq1 由栖霞组顶部、茅一 1 亚段和茅一 2 亚段构成。栖霞组顶部为该层序的陆架边缘体系域，而茅一 1 亚段为海侵体系域，茅一 2 亚段为高位体系域。该四级层序内茅口组的岩相序列自下而上表现为生屑泥晶灰岩 (MF4) 演化为眼皮眼球状灰岩 (MF2、MF3)，而后向上再次转

换为浅灰色中—厚层生屑泥晶灰岩 (MF4), 反映了由中缓坡 (MF4)–外缓坡 (MF2、MF3)–中缓坡 (MF4) 的沉积相序演化, 构成一个完整的四级海侵—海退旋回 (图 6); 茅一 1 亚段的伽马值在四级海泛面附近增大, 而后茅一 2 亚段的伽马值逐渐降低, 也较好地响应了四级层序的结构。(2) 四级层序 sq2 由茅一 3 亚段和茅一 4 亚段中下部构成。茅一 3 亚段底部以一套明显的纹层状含生屑泥 (晶) 灰岩 (MF2) 与下伏四级层序 sq1 顶部的中缓坡生屑泥晶灰岩 (MF4) 突变接触 (图 7-D), 指示了显著的海侵事件, 与之对应的伽马值呈指状明显升高 (图 6), 为茅一 3 亚段盆地内稳定分布的标志层。随后茅一 3 亚段以外缓坡相眼皮—眼球状灰岩 (MF2、MF3)、泥晶灰岩 (MF1) 组成四级海侵体系域退积准层序组, 其顶部也呈现出稳定分布的高伽马值特征, 反映了低能细粒物质的富集 (图 6)。茅一 4 亚段中下部主要发育中—厚层生屑泥晶灰岩 (MF4), 夹泥晶灰岩 (MF1), 整体为中缓坡沉积, 对应伽马值继下伏茅一 3 亚段之后呈降低趋势, 反映了四级层序 sq2 高位体系域海退序列 (图 6)。(3) 茅一 4 亚段上部一系列薄层—中层泥晶灰岩 (MF1) 构成了四级层序 sq3 的海侵体系域退积准层序组 (图 7-E), 其伽马值也逐渐升高 (图 6), 反映了继茅一 4 亚段中下部海退序列之后的再次海侵沉积, 该海侵体系域对应三级层序 SQ1 海侵末期, 体系域顶界面为三级层序 SQ1 最大海泛面 (MFS1); 四级层序 sq3 的高位体系域对应与三级层序 SQ1 高位体系域 (SQ1-HST), 主要表现为茅二下亚段沉积早期外缓坡相泥晶灰岩 (MF1) 和含生屑泥灰岩 (MF2)、中缓坡生屑泥晶灰岩 (MF4) 的高位加积作用, 而后高位体系域晚期海退, 形成内缓坡泥晶生屑灰岩 (MF5) 和残余生屑云质灰岩 (MF6) 沉积 (图 6)。生物地层与层序结构的对应关系指示茅二下亚段早期加积可能响应了 Haq (2008) 构建的全球海平面在沃德阶的高位低幅短期变化。

三级层序 SQ2 由四级层序 sq4 组成, 包含了茅二下亚段顶部和茅二上亚段。二崖剖面的生物地层指示茅二下亚段沉积末期, 海平面下降后缓慢上升, 发育中缓坡生屑泥晶灰岩 (MF4), 组成三级层序 SQ2 的陆架边缘体系域 (SQ2-SMST) (图 6)。而后在茅二上亚段下部出现了一套相对高伽马值的

外缓坡含生屑泥晶灰岩 (MF2), 是海侵过程的物质表现, 指示三级层序 SQ2 的海侵体系域 (SQ2-TST)。随后峨眉山大火成岩省或扬子北缘洋壳俯冲作用诱导的构造拉张驱动二崖剖面北侧台内海槽的发育, 具体表现为成 20 井茅二上亚段突然出现的深水斜坡相沉积, 奠定了广安地区的二崖剖面茅二上亚段台地边缘沉积格局; 在瓜德鲁普世晚期的全球海退背景下, 二崖剖面发育台缘滩相残余生屑晶粒云岩 (MF7), 构成三级层序 SQ2 的高位体系域 (SQ2-HST) (图 6)。

三级层序 SQ3 对应于茅三段, 发育一个四级层序 sq5, 在二崖剖面以一套高伽马、深色薄层含生屑泥晶灰岩 (MF2) 覆盖在下伏厚层块状白云岩之上, 是继三级层序 SQ2 海退之后的快速海侵序列 (SQ3-TST) (图 6)。紧接着海平面大幅下降, 沉积茅三段上部的高能台缘滩相内碎屑亮晶灰岩 (图 6), 富含大型蠕类有孔虫, 组成三级层序 SQ3 的高位体系域 (SQ3-HST)。

3.3 层序地层格架

茅口组沉积早期, 四川盆地呈现出“南西高、北东低”的缓坡沉积地貌, 而后在伸展作用下, 川中—川北地区发生构造分异, 形成槽台分异的构造格局。鉴于构造—沉积格局走向, 笔者在单井/剖面的层序结构约束下, 针对川中—川北地区构建了跨浅水—深水沉积相带的自西南到北东向连井剖面 (图 8), 开展高精度地层对比和沉积演化的动态分析。该剖面以茅一段顶部三级最大海泛面 (MFS1) 近似为等时对比面。该界面附近的伽马特征较为一致, 均表现为高伽马值向茅二下亚段逐渐降低, 可作为剖面对比的标志层 (图 8)。

三级层序 SQ1 海侵体系域内的各个四级层序单元侧向对比较好, 伽马曲线存在高度相似的旋回变化特征, 侧向厚度整体表现为向北东方向增大, 增厚的单元主要为四级层序 sq1 的海侵体系域以及 sq2 的高位体系域, 其余四级层序单元侧向厚度稳定 (图 8)。四级层序 sq1 的海侵体系域增厚特征反映了茅口组沉积初期海侵背景下, 海水自北东向西南侵入扬子克拉通, 受缓坡构造格局可容纳空间控制, 碳酸盐岩逐渐向西南方向上超于缓坡地貌之上 (图 8); 四级层序 sq2 的高位体系域在成 20 井发育泥晶生屑灰岩, 可能为四级层序 sq2 的晚期海

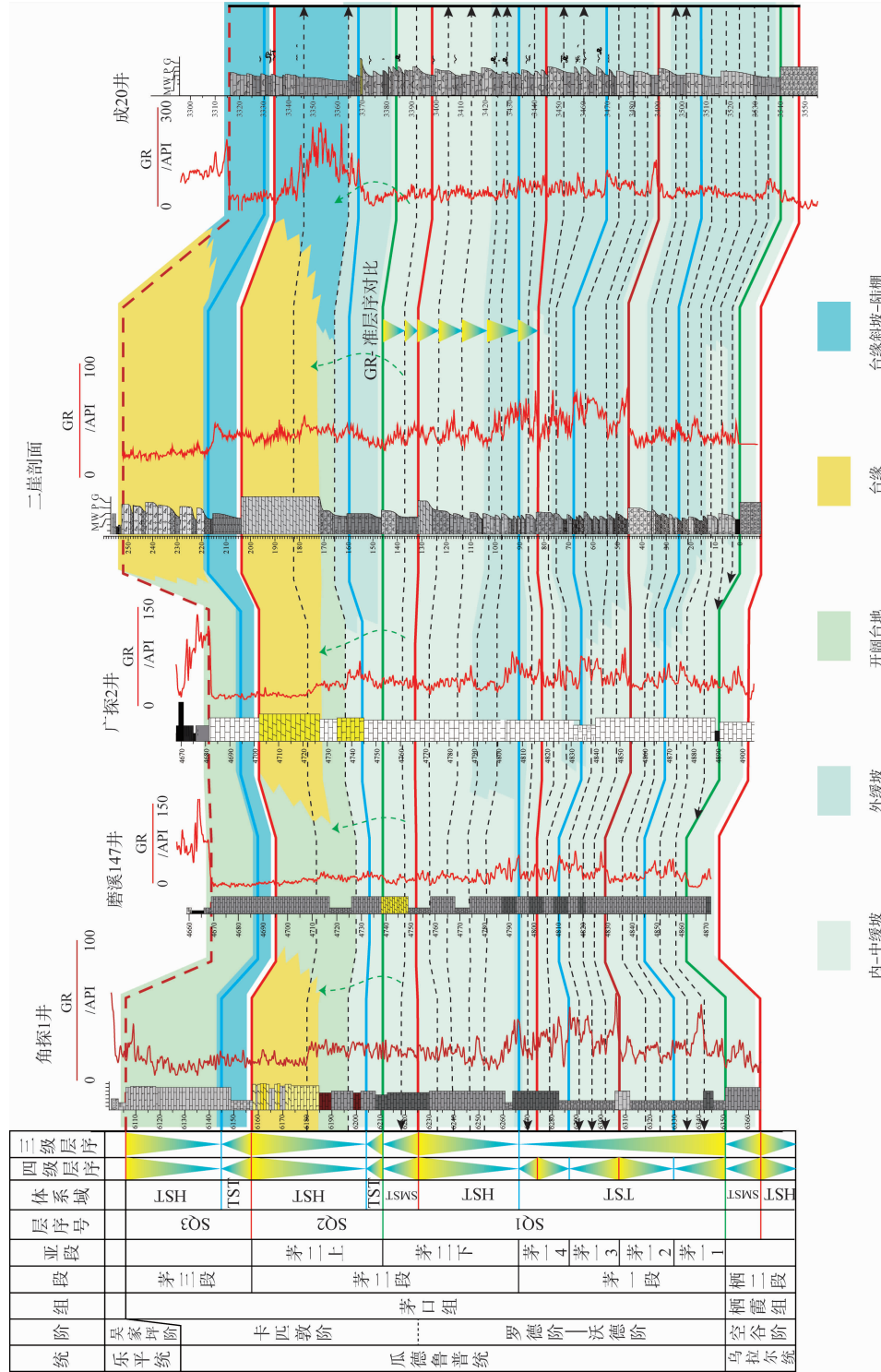


图 8 川中地区茅口组地层及沉积相对比剖面 (剖面位置见图 4)

Fig. 8 Correlation profile of stratigraphy sequence and sedimentary facies of the Maokou Formation in central Sichuan (profile location shown in Fig. 4)

退，驱动缓坡滩相向北迁移，造成地层局部增厚。三级层序 SQ1 的高位体系域（四级层序 sq3 高位体系域）在伽马曲线上体现出多套准层序加积的趋势（图 8），这与二崖剖面的岩相组合加积特征较为相似，指示了海侵至高位后缓坡背景下碳酸盐岩的垂向稳定建造，导致地层厚度侧向差异较小。该时期缓坡格局下的垂向碳酸盐岩加积作用也可能使单斜缓坡逐渐平坦，为后续台地沉积体系奠定了古地貌基础。

三级层序 SQ2（四级层序 sq4）的陆架边缘体系域稳定分布，而海侵体系域在二崖剖面 and 成 20 井存在略微增厚特征（图 8），发育深缓坡含生屑泥晶灰岩，指示海侵超覆的增厚过程；高位体系域时期，在成 20 井区和角探 1 井北侧分别发育裂隙槽，表现为较小的地层厚度，指示了缓慢沉积过程。位于广安构造的二崖剖面、广探 2 井和八角场构造的角探 1 井分别发育较厚的台缘滩相白云岩，而磨溪井区则为台地相沉积，碳酸盐沉积速率相对较低，地层较薄（图 8）。

三级层序 SQ3（四级层序 sq5）快速海侵导致台地沉积体系整体淹没，台缘带停止建造，地层单元侧向厚度差异较小，川中—川北地区茅三段下部普遍发育硅质泥晶灰岩等低能沉积，二崖剖面由台缘滩厚层块状白云岩序列转换为深灰色薄层含生屑泥晶灰岩（图 8）；高位体系域沉积时期，二崖剖面的内碎屑亮晶灰岩厚度远大于磨溪地区，表明二崖剖面 and 角探 1 井在海退过程中，台缘沉积再次发育，其碳酸盐沉积速率远高于处于开阔台地相带的磨溪—龙女寺地区（图 8）。

4 层序结构约束下的储集层分布

随着碳酸盐岩层序地层学与碳酸盐岩成岩作用研究的蓬勃发展，前人逐渐关注到层序格架对碳酸盐岩成岩作用及储集层发育的控制，尤其是碳酸盐岩层序地层格架与准同生成岩作用具有密切关系。杜远生和颜佳新（1995）从准同生成岩序列、成岩作用类型 2 个方面对陆架边缘体系域（或低位体系域）、海侵体系域、高位体系域及 I、II 型层序界面的成岩特征进行了探讨，提出高位体系域常为强烈的准同生早—晚期叠加白云石化，形成复合的白云岩类型，而陆架边缘体系域和海侵体系域均以准同生早期白云石化为主，表现为潮坪白云岩与

潮下灰岩的交互沉积。

川中—川北地区茅口组白云岩储集层是四川盆地油气勘探的焦点，明确其分布规律和成因机制是油气勘探的关键。已有钻井资料表明，川中—川北地区茅口组白云岩储集层垂向上分布于茅二下亚段和茅二上亚段（图 4；图 9）。茅二下亚段的云化储集层平面展布特征受控于川中古隆起，环川中古隆起前缘的磨溪—龙女寺—合川—潼南地区连片分布（图 4-B）；三级层序 SQ2 高位体系域时期的构造分异作用和海退过程导致茅二上亚段白云岩储集层向北迁移，沿广安—八角场地区呈北西—南东向展布（图 4）。尽管川中地区茅口组白云岩成因存在较大争议，但是均认同准同生期白云化作用的存在（李让彬等，2021；王良军等，2022；肖钦仁等，2023；徐婷等，2024），因此研究层序地层格架约束下的储集层发育特征对成岩序列的厘定和储集层分布的预测均有重要意义。本研究构建的高精度层序结构既约束了茅口组白云岩储集层的横、纵向时空分布规律，又以海平面变化初步解释了储集层的动态沉积演化机制。

磨溪—龙女寺地区的茅二下亚段云化储集层稳定分布在三级层序 SQ1 高位体系域晚期和三级层序 SQ2 陆架边缘体系域（图 9）。三级层序 SQ1 高位体系域的白云质灰岩体现为残余生屑颗粒结构，指示其原岩为生屑滩沉积；三级层序 SQ2 陆架边缘体系域的云化储集层相对较薄，常以雾心亮边的云质灰岩夹层形式产出于灰岩序列，生屑结构欠发育（徐婷等，2024）。这 2 套沉积序列在时空上表现出一定的继承性，指示其云化机制可能存在一定的关联性。三级层序 SQ1 高位晚期海退形成了环川中古隆起的内缓坡颗粒滩，随后在三级层序 SQ2 陆架边缘体系域时期的缓慢海侵，逐渐使得滩间局限环境的发育，沉积薄层云质灰岩，以准同生早期海水云化为主。与此同时，先存高位体系域的颗粒滩在陆架边缘体系域滩间局限环境的海水交代作用下，发生准同生晚期白云石化，形成残余生屑云质灰岩。

广安—八角场地区茅二上亚段的白云岩主要以厚层块状的台缘滩相残余生屑晶粒云岩产出，分布于三级层序 SQ2 高位体系域（图 9）。川中—川北地区该套储集层具有“类型多样、期次复杂、相控明显”的特征。八角场地区蓬深 12 井茅二上亚段云质灰岩储集层以生物体腔溶蚀孔为主，晶间孔

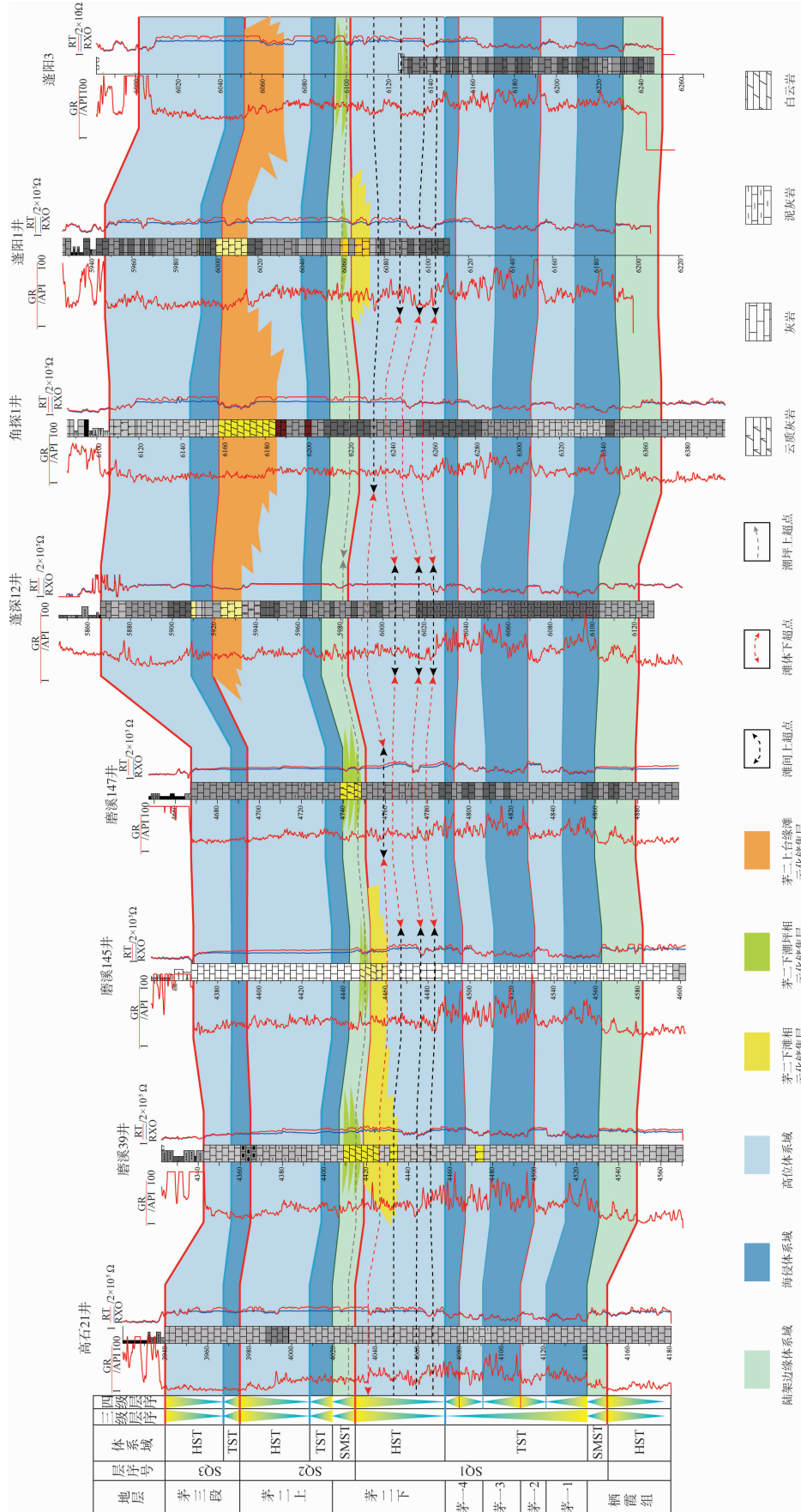


图 9 川中地区茅口组层序格架约束下储集层对比图(剖面位置见图 4)
Fig. 9 Reservoir comparison under constraints from stratigraphic sequence of the Maokou Formation in central Sichuan Basin(profile location shown in Fig. 4)

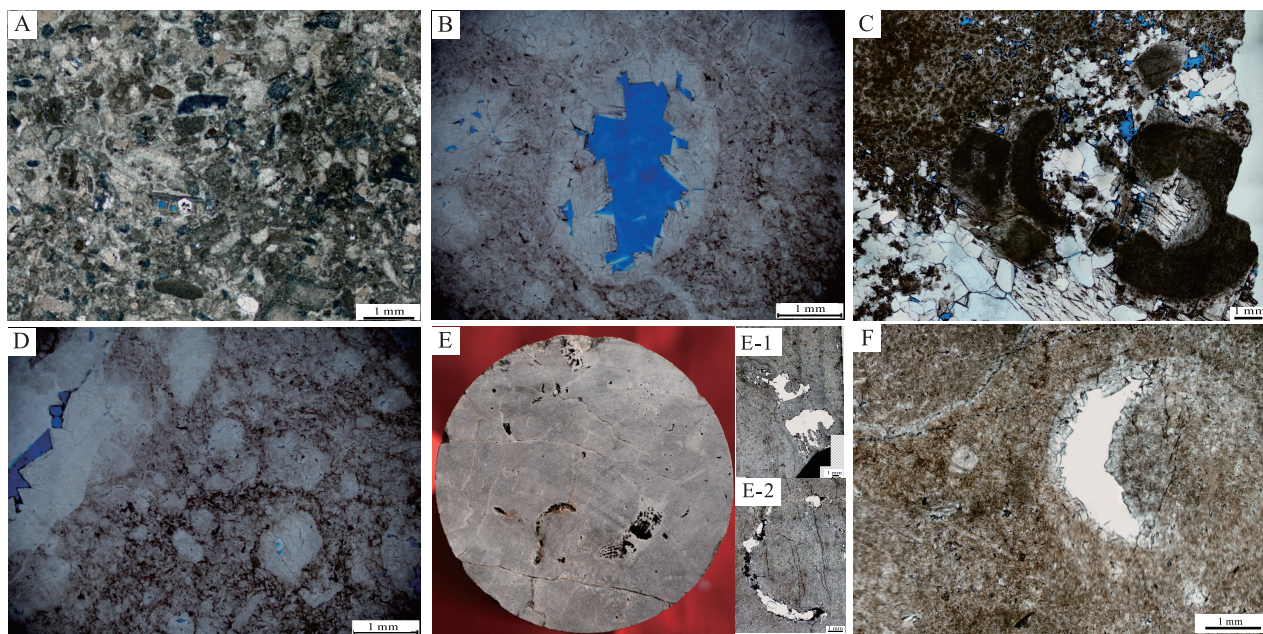
欠发育。生屑颗粒云化较弱而溶蚀较强(图 10-A),可能指示了生屑灰岩在高位体系域海退过程中,经历了准同生晚期的颗粒溶蚀作用并且为准同生晚期—埋藏期的部分白云石化提供了云化流体通道;蓬阳 1 井和广安地区(如广参 2、二崖)为规模较大的残余生屑晶粒云岩储集层,其中晶间孔与生物格架孔均较为发育(图 10-B 至 10-F),见多期白云石。该套储集层的原岩为生屑灰岩,其早期为颗粒支撑架构,有利于准同生早期云化流体进入粒间孔,形成了准同生早期云化的基质白云石;而另一方面,生屑灰岩的生屑颗粒在准同生晚期接受大气淡水溶蚀后形成生物体腔孔,准同生晚期—埋藏期阶段的多期云化流体沿生物体腔形成对应的多期白云石(图 10-B 至 10-F)。

综上所述,川中地区茅二下亚段云化储集层受控于 II 型层序界面 SB2,主要为准同生早期—晚期局限海水交代云化作用;茅二上亚段的白云岩受控于 I 型层序 SB3,经历了准同生期早期云化→准同生晚期溶蚀→埋藏期云化的成岩过程。

5 结论

1) 川中广安二崖剖面茅口组共发育 8 类岩石微相,分别为外缓坡相/斜坡—陆棚相层状泥(晶)灰岩(MF1)、含生屑泥(晶)灰岩(MF2)岩相组合,中缓坡/台地相透镜状生屑泥晶灰岩(MF3)、层状生屑泥晶灰岩(MF4)岩相组合,内缓坡/台地相泥晶生屑灰岩(MF5)、残余生屑云质灰岩(MF6),及缓坡型台地边缘滩相残余生屑晶粒云岩(MF7)、内碎屑亮晶灰岩(MF8)。由于茅口组沉积晚期峨眉山大火成岩省的活动以及川北洋壳俯冲作用,川中地区在茅口组晚期发生构造分异,茅口组沉积过程经历了由缓坡向缓坡型台地沉积体系的演化。

2) 二崖剖面栖霞组顶部—茅口组共识别出 4 个三级层序界面,分别为栖霞组上部层序界面 SB1,茅二下亚段上部层序界面 SB2,茅二下亚段顶界面 SB3,茅三段顶界面 SB4。层序界面 SB1 和层序界面 SB2 为缓坡体系的 II 型层序界面,且其上部均发育陆架边缘体系域。层序界面 SB3 和层序界面 SB4 均为 I 型层序界面,且层序界面 SB3



A—蓬深 12 井, 5926.3 m, 生屑灰岩, 生物体腔孔, 铸体薄片, 单偏光; B—广参 2 井, 4596 m, 残余生屑晶粒云岩, 原岩恢复可见生屑颗粒幻影, 沿体腔孔生长多期白云石, 铸体薄片, 单偏光; C—蓬阳 1 井, 6006 m, 残余生屑云岩, 棘皮溶蚀后, 沿溶蚀部位生长白云石; D—广参 2 井, 4598 m, 残余生屑晶粒云岩, 原岩恢复可见生屑幻影结构, 生屑内部见溶蚀孔洞, 铸体薄片, 单偏光; E—蓬阳 3 井, 6058.7 m, 全直径岩心截面, 见珊瑚虫等生屑溶蚀体腔孔, E-1 和 E-2 分别为岩心部位上的微观薄片照片; F—二崖剖面, P₂m-103-3, 生物体腔溶蚀孔, 孔壁见多期白云石

图 10 川中—川北地区茅口组储集层微观岩相特征

Fig. 10 Microfacies characteristics of reservoirs from the Maokou Formation in central-northern Sichuan Basin

为淹没不整合,层序界面 SB4 为剥蚀不整合。

3) 二崖剖面栖霞组上部至茅口组可划分为 3 个三级层序、5 个四级层序。栖霞组上部发育三级层序 SQ1 陆架边缘体系域,茅一段为三级层序 SQ1 的海侵体系域,整体为眼皮—眼球状外缓坡岩相组合,局部发育中缓坡生屑泥晶灰岩;而茅二下亚段主体为三级层序 SQ1 高位体系域,以内缓坡泥晶生屑灰岩为主,体系域上部沉积内缓坡滩相残余生屑云质灰岩。茅二下亚段上部发育三级层序 SQ2 中缓坡陆架边缘体系域,茅二上亚段早期为三级层序 SQ2 海侵体系域的外缓坡含生屑泥晶灰岩,而后由于构造—沉积分异导致北缘成 20 井相变为深水泥灰岩和含生屑泥灰岩沉积,川中地区开始转变为缓坡型台地沉积体系,二崖剖面在茅二上亚段晚期发育三级层序 SQ2 高位体系域台缘滩相残余生屑晶粒云岩。茅三段沉积早期海侵淹没台地沉积体系,形成淹没不整合以及三级层序 SQ3 海侵体系域斜坡—陆棚相含生屑泥晶灰岩,随后海退再次发育三级层序 SQ3 高位体系域台缘相带内碎屑亮晶灰岩沉积。

4) 川中地区茅口组云化储集层受控于层序结构。SQ1 高位体系域末期海退形成了茅二下亚段生屑滩相沉积,而后 II 型层序界面 SB2 之上的陆架边缘体系域局限环境沉积了准同生早期的云质灰岩,并且导致了茅二下亚段高位体系域生屑灰岩的准同生晚期交代云化。茅二上亚段的储集层受控于 I 型层序界面 SB3,经历了准同生期早期基质云化→准同生晚期颗粒溶蚀→埋藏期云化阶段,形成多期白云石。

致谢 感谢中国石油西南油气田分公司提供实际钻井资料的支持与帮助!

参考文献 (References)

杜远生,颜佳新. 1995. 碳酸盐准同生成岩作用分析在层序地层研究中的意义. 岩相古地理,15(1): 10-17. [Du Y S, Yan J X. 1995. Implications of penecontemporaneous diagenesis of carbonates for the study of sequence stratigraphy. *Sedimentary Facies and Palaeogeography*, 15(1): 10-17]

冯增昭. 1982. 碳酸盐岩分类. 石油学报,3(1): 11-18, 96-98. [Feng Z Z. 1982. Classification of carbonate rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 3(1): 11-18, 96-98]

胡明毅,胡忠贵,魏国齐,杨威,刘满仓. 2012. 四川盆地茅口组层序岩相古地理特征及储集层预测. 石油勘探与开发,39(1): 45-55. [Hu M Y, Hu Z G, Wei G Q, Yang W, Liu M C. 2012. Se-

quence lithofacies paleogeography and reservoir prediction of the Maokou Formation in Sichuan Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 39(1): 45-55]

何登发,李德生,张国伟,赵路子,樊春,鲁人齐,文竹. 2011. 四川多旋回叠合盆地的形成与演化. 地质科学,46(3): 589-606. [He D F, Li D S, Zhang G W, Zhao L Z, Fan C, Lu R Q, Wen Z. 2011. Formation and evolution of multi-cycle superposed Sichuan Basin, China. *Scientia Geologica Sinica*, 46(3): 589-606]

何斌,徐义刚,王雅玫,肖龙. 2005. 东吴运动性质的厘定及其时空演变规律. 地球科学,30(1): 89-96. [He B, Xu Y G, Wang Y M, Xiao L. 2005. Nature of the Dongwu movement and its temporal and spatial evolution. *Earth Science*, 30(1): 89-96]

何斌,徐义刚,肖龙,王雅玫,王康明,沙绍礼. 2006. 峨眉山地幔柱上升的沉积响应及其地质意义. 地质论评,52(1): 30-37. [He B, Xu Y G, Xiao L, Wang Y M, Wang K M, Sha S L. 2006. Sedimentary responses to uplift of Emeishan mantle plume and its implications. *Geological Review*, 52(1): 30-37]

黄涵宇,何登发,李英强,王贝. 2017. 四川盆地及邻区二叠纪梁山—栖霞组沉积盆地原型及其演化. 岩石学报,33(4): 1317-1337. [Huang H Y, He D F, Li Y Q, Wang B. 2017. The prototype and its evolution of the Sichuan sedimentary basin and adjacent areas during Liangshan and Qixia stages in Permian. *Acta Petrologica Sinica*, 33(4): 1317-1337]

韩月卿,郝运轻,韩文彪,林娟华,赵红琴,李双建. 2022. 川东南地区中二叠统茅口组一段眼球状灰岩成因机理. 油气地质与采收率,29(6): 12-21. [Han Y Q, Hao Y Q, Han W B, Lin J H, Zhao H Q, Li S J. 2022. Genetic mechanism of eyeball-shaped limestone in First Member of Middle Permian Maokou Formation in southeast Sichuan Basin. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 29(6): 12-21]

罗进雄,何幼斌. 2010. 中—上扬子地区二叠系眼球状石灰岩特征及成因研究. 地质论评,56(5): 629-637. [Luo J X, He Y B. 2010. Origin and characteristics of Permian eyeball-shaped limestones in Middle-Upper Yangtze region. *Geological Review*, 56(5): 629-637]

李让彬,段金宝,潘磊,李红. 2021. 川东地区中二叠统茅口组白云岩储层成因机理及主控因素. 天然气地球科学,32(9): 1347-1357. [Li R B, Duan J B, Pan L, Li H. 2021. Genetic mechanism and main controlling factors of the Middle Permian Maokou Formation dolomite reservoirs in the eastern Sichuan Basin. *Natural Gas Geoscience*, 32(9): 1347-1357]

李旭兵,曾雄伟,王传尚,刘安,白云山. 2011. 东吴运动的沉积学响应: 以湘鄂西及邻区二叠系茅口组顶部不整合面为例. 地层学杂志,35(3): 299-304. [Li X B, Zeng X W, Wang C S, Liu A, Bai Y S. 2011. Sedimentary response to the Dongwu Movement: a case of the unconformity on top of the Permian Maokou Formation in the western Hubei-Hunan and neighboring areas. *Journal of Stratigraphy*, 35(3): 299-304]

罗志立,金以钟,朱夔玉,赵锡奎. 1988. 试论上扬子地台的峨眉地裂运动. 地质论评,34(1): 11-24. [Luo Z L, Jin Y Z, Zhu K Y, Zhao X K. 1988. On Emei taphrogenesis of the upper Yangtze Platform. *Geological Review*, 34(1): 11-24]

- 梅仕龙, 史晓颖, 陈学方, 孙克勤, 颜佳新. 1999. 黔南桂中二叠系 Cisuralian 统和 Guadalupian 统层序地层及其与牙形石演化的关系. 地球科学, 24(1): 23-33. [Mei S L, Shi X Y, Chen X F, Sun K Q, Yan J X. 1999. Permian Cisuralian and Guadalupian sequence stratigraphy in south Guizhou and central Guangxi and its relation to conodont evolution. *Earth Science*, 24(1): 23-33]
- 覃建雄, 曾允孚, 陈洪德, 田景春, 李余生, 钱奕中, 寿建峰, 沈安江. 1998. 西南地区二叠纪层序地层及海平面变化. 岩相古地理, 18(1): 21-25, 28-37. [Qin J X, Zeng Y F, Chen H D, Tian J C, Li Y S, Qian Y Z, Shou J F, Shen A J. 1998. Permian sequence stratigraphy and sea-level changes in southwestern China. *Sedimentary Facies and Palaeogeography*, 18(1): 21-25, 28-37]
- 邱振, 窦立荣, 吴建发, 韦恒叶, 刘雯, 孔维亮, 张琴, 蔡光银, 张溢, 吴伟, 李世臻, 曲天泉, 高万里. 2024. 川北—鄂西地区中二叠统层序岩相古地理演化及页岩气勘探潜力. 地球科学, 49(2): 712-748. [Qiu Z, Dou L R, Wu J F, Wei H Y, Liu W, Kong W L, Zhang Q, Cai G Y, Zhang G, Wu W, Li S Z, Qu T Q, Gao W L. 2024. Lithofacies palaeogeographic evolution of the Middle Permian sequence stratigraphy and its implications for shale gas exploration in the northern Sichuan and western Hubei Provinces. *Earth Science*, 49(2): 712-748]
- 苏旺, 江青春, 陈志勇, 汪泽成, 姜华, 卞从胜, 冯庆付, 吴育林. 2015. 四川盆地中二叠统茅口组层序地层特征及其对源储的控制作用. 天然气工业, 35(7): 34-43. [Su W, Jiang Q C, Chen Z Y, Wang Z C, Jiang H, Bian C S, Feng Q F, Wu Y L. 2015. Sequence stratigraphic features of Middle Permian Maokou Formation in the Sichuan Basin and their controls on source rocks and reservoirs. *Natural Gas Industry*, 35(7): 34-43]
- 苏成鹏, 李蓉, 石国山, 贾霍甫, 宋晓波. 2021. 四川盆地及周缘中二叠统茅口组一段储集层特征及对油气勘探的启示. 石油勘探与开发, 48(6): 1150-1161. [Su C P, Li R, Shi G S, Jia H F, Song X B. 2021. Reservoir characteristics of the first member of Middle Permian Maokou Formation in Sichuan Basin and its periphery and inspirations to petroleum exploration, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 48(6): 1150-1161]
- 王良军, 李红, 曾韬, 柳益群, 潘磊, 李让彬, 李文厚, 张冬冬, 焦鑫, 杨康, 董杨坤. 2022. 四川盆地东部茅口组白云岩成因: 来自岩石学、矿物学和地球化学的证据. 古地理学报, 24(5): 989-1016. [Wang L J, Li H, Zeng T, Liu Y Q, Pan L, Li R B, Li W H, Zhang D D, Jiao X, Yang K, Dong Y K. 2022. Origins of dolostones of the Maokou Formation in eastern Sichuan Basin: evidence from lithology, mineralogy, and geochemistry. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 24(5): 989-1016]
- 王兴志, 李博, 杨西燕, 文龙, 徐亮, 谢圣阳, 杜垚, 冯明友, 杨雪飞, 王雅萍, 裴森奇. 2021. 四川盆地北部中二叠世晚期“广元—旺苍”海槽特征及其油气地质意义. 石油勘探与开发, 48(3): 562-574. [Wang X Z, Li B, Yang X Y, Wen L, Xu L, Xie S Y, Du Y, Feng M Y, Yang X F, Wang Y P, Pei S Q. 2021. Characteristics of “Guangyuan-Wangcang” trough during late Middle Permian and its petroleum geological significance in northern Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 48(3): 562-574]
- 徐婷, 袁海锋, 陈聪, 张玺华, 山述娇, 匡明志, 谌辰, 叶子旭, 李天军, 阳聪. 2024. 川中磨溪—龙女寺构造中二叠统茅口组白云岩成因分析. 天然气地球科学, 35(1): 13-29. [Xu T, Yuan H F, Chen C, Zhang X H, Shan S J, Kuang M Z, Chen C, Ye Z X, Li T J, Yang C. 2024. Genesis of dolomite reservoirs in the Middle Permian Maokou Formation of the Moxi-Longnvs structure, central Sichuan Basin. *Natural Gas Geoscience*, 35(1): 13-29]
- 肖钦仁, 袁海锋, 叶子旭, 陈聪, 张玺华, 徐婷. 2023. 川中北部地区八角场构造二叠系茅口组白云岩储层成因机制. 天然气地球科学, 34(7): 1218-1236. [Xiao Q R, Yuan H F, Ye Z X, Chen C, Zhang X H, Xu T. 2023. Genetic mechanism of dolomite reservoir in Permian Maokou Formation in Bajiaochang structure in North Central Sichuan. *Natural Gas Geoscience*, 34(7): 1218-1236]
- 殷鸿福. 1994. 二叠系—三叠系研究的进展. 地球科学进展, 9(2): 1-10. [Yin H F. 1994. Advancements of Permian and Triassic research. *Advances in Earth Science*, 9(2): 1-10]
- 殷鸿福, 童金南, 丁梅华, 张克信, 赖旭龙. 1994. 扬子区晚二叠世—中三叠世海平面变化. 地球科学, 19(5): 627-632. [Yin H F, Tong J N, Ding M H, Zhang K X, Lai X L. 1994. Late Permian-Middle Triassic sea level changes of Yangtze platform. *Earth Science*, 19(5): 627-632]
- 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 Chihsia-Maokou period in the Sichuan Basin and indications for oil-gas exploration. *Acta Sedimentologica Sinica*, 39(6): 1466-1477]
- 杨雨, 谢继容, 赵路子, 黄平辉, 张玺华, 陈聪, 张本健, 文龙, 汪华, 高兆龙, 山述娇. 2021. 四川盆地茅口组滩相孔隙型白云岩储层天然气勘探的突破及启示: 以川中北部地区 JT1 井天然气立体勘探为例. 天然气工业, 41(2): 1-9. [Yang Y, Xie J R, Zhao L Z, Huang P H, Zhang X H, Chen C, Zhang B J, Wen L, Wang H, Gao Z L, Shan S J. 2021. Breakthrough of natural gas exploration in the beach facies porous dolomite reservoir of Middle Permian Maokou Formation in the Sichuan Basin and its enlightenment: a case study of the tridimensional exploration of Well JT1 in the central-northern Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 41(2): 1-9]
- Ahr W M. 1973. The carbonate ramp: an alternative to the shelf model. *Gcags Transactions*, 23: 221-225.
- Borgomano J, Lanteaume C, Léonide P, Fournier F, Montagnoni L F, Masse J P. 2020. Quantitative carbonate sequence stratigraphy: insights from stratigraphic forward models. *AAPG Bulletin*, 104(5): 1115-1142.
- Burchette T P, Wright V P. 1992. Carbonate ramp depositional systems. *Sedimentary Geology*, 79(1-4): 3-57.
- Chen B, Joachimski M M, Sun Y D, Shen S Z, Lai X L. 2011. Carbon and conodont apatite oxygen isotope records of Guadalupian-Lopingian boundary sections: climatic or sea-level signal? *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 311(3): 145-153.
- Flügel E. 2010. *Microfacies of Carbonate Rocks: Analysis, Interpretation and Application*. Berlin: Springer.

- Glenister B F, Wardlaw B R, Lambert L L, Spinosa C, Wilde G L. 1999. Proposal of Guadalupian and component Roadian, Wordian, and Capitanian stages as international standards for the Middle Permian Series. *Permophiles*, 34: 3–11.
- Haq B U, Hardenbol J, Vail P R. 1988. Mesozoic and Cenozoic Chronostratigraphy and Cycles of Sea-level Change. *Special Publications, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists*, 42: 71–108.
- Haq B U, Schutter S R. 2008. A chronology of Paleozoic sea-level changes. *Science*, 322(5898): 64–68.
- Hunt D, Tucker M E. 1992. Stranded parasequences and the forced regressive wedge systems tract: deposition during base-level fall. *Sedimentary Geology*, 81(1–2): 1–9.
- Jin Y G, Zhang J, Shang Q H. 1994. Two phases of the end-Permian mass extinction. Pangea: global environments and resources. *Canadian Society of Petroleum Geologists Memoir*, 17: 813–822.
- Jin Y G, Wardlaw B R, Glenister B F, Kotlyar G V. 1997. Permian chronostratigraphic subdivisions. *Episodes*, 20(1): 10–15.
- Jin Y G, Shang Q H, Wang X D, Wang Y, Sheng J Z. 1999. Chronostratigraphic subdivision and correlation of the Permian in China. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 73(2): 127–138.
- Kofukuda D, Isozaki Y, Igo H. 2014. A remarkable sea-level drop and relevant biotic responses across the Guadalupian-Lopingian (Permian) boundary in low-latitude mid-Panthalassa: irreversible changes recorded in accreted paleo-atoll limestones in Akasaka and Ishiyama, Japan. *Journal of Asian Earth Sciences*, 82: 47–65.
- Lai X L, Wang W, Wignall P B, Bond D P G, Jiang H S, Ali J R, John E H, Sun Y D. 2008. Palaeoenvironmental change during the end-Guadalupian (Permian) mass extinction in Sichuan, China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 269(1–2): 78–93.
- Lei H, Jiang Q C, Huang W H, Luo P. 2024. Middle Permian astronomically forced upwelling in the Yangtze carbonate platform: implications for organic matter preservation and benthic biomass. *Marine and Petroleum Geology*, 160: 106575.
- Meng Q, Xue W Q, Chen F Y, Yan J X, Cai J H, Sun Y D, Wignall P B, Liu K, Liu Z C, Chen D. 2022. Stratigraphy of the Guadalupian (Permian) siliceous deposits from central Guizhou of South China: regional correlations with implications for carbonate productivity during the Middle Permian biocrisis. *Earth-Science Reviews*, 228: 104011.
- Peng Y F, Li H, BouDagher-Fadel M, Wang L J, Zhang D D, Zheng T Y, Yang K. 2022. Benthic foraminifera distribution and sedimentary environmental evolution of a carbonate platform: a case study of the Guadalupian (middle Permian) in eastern Sichuan Basin. *Marine Micropaleontology*, 170: 102079.
- Qiu Z, Wang Q C, Zou C N, Yan D T, Wei H Y. 2014. Transgressive-regressive sequences on the slope of an isolated carbonate platform (Middle–Late Permian, Laibin, South China). *Facies*, 60(1): 327–345.
- Ross C A, Ross J R P. 1987. Late Paleozoic sea levels and depositional sequences. *Cushman Foundation for Foraminiferal Research*: 137.
- Shen S Z, Wang Y, Henderson C M, Cao C Q, Wang W. 2007. Biostratigraphy and lithofacies of the Permian System in the Laibin-Heshan area of Guangxi, South China. *Palaeoworld*, 16(1–3): 120–139.
- Shen S Z, Yuan D X, Henderson C M, Wu Q, Zhang Y C, Zhang H, Mu L, Ramezani J, Wang X D, Lambert L L, Erwin D H, Hearst J M, Xiang L, Chen B, Fan J X, Wang Y, Wang W Q, Qi Y P, Chen J, Qie W K, Wang T T. 2020. Progress, problems and prospects: an overview of the Guadalupian Series of South China and North America. *Earth-Science Reviews*, 211: 103412.
- Su W, Hu S Y, Jiang Q C, Zhang J, Huang S P, Jiang H, Shi S Y, Wang K, Chen X Y, Zhang H R, Ren M Y. 2020a. Sedimentary responses to the Dongwu Movement and the influence of the Emeishan mantle plume in Sichuan Basin, Southwest China: significance for petroleum geology. *Carbonates and Evaporites*, 35(4): 108.
- Su C P, Li F, Tan X C, Gong Q L, Zeng K, Tang H, Li M L, Wang X F. 2020b. Recognition of diagenetic contribution to the formation of limestone-marl alternations: a case study from Permian of South China. *Marine and Petroleum Geology*, 111: 765–785.
- Vail P R. 1977. Seismic stratigraphy and global changes of sea-level, part 4: global cycles of relative changes of sea-level. *Seismic stratigraphy-applications to hydrocarbon exploration. AAPG Memoir*, 26: 49–212.
- Vail P R, Hardenbol J, Todd R G. 1984. Jurassic Unconformities, Chronostratigraphy, and Sea-level Changes from Seismic Stratigraphy and Biostratigraphy. *AAPG Memoir*, 36: 129–144.
- Wignall P B, Védérine S, Bond D P G, Wang W, Lai X L, Ali J R, Jiang H S. 2009. Facies analysis and sea-level change at the Guadalupian-Lopingian global stratotype (Laibin, South China), and its bearing on the end-Guadalupian mass extinction. *Journal of the Geological Society*, 166(4): 655–666.
- Wang Y, Jin Y G. 2000. Permian palaeogeographic evolution of the Jiangnan Basin, South China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 160(1–2): 35–44.
- Wang X T, Shao L Y, Eriksson K A, Yan Z M, Wang J M, Li H, Zhou R X, Lu J. 2020. Evolution of a plume-influenced source-to-sink system: an example from the coupled central Emeishan large igneous province and adjacent western Yangtze cratonic basin in the Late Permian, SW China. *Earth-Science Reviews*, 207: 103224.
- Ziegler A M, Eshel G, Rees P M, Rothfus T A, Rowley D B, Sunderlin D. 2003. Tracing the tropics across land and sea: Permian to present. *Lethaia*, 36(3): 227–254.
- Zheng H, Liu B. 2020. Structural Differentiation and Sedimentary System of the Permian Sichuan Cratonic Basin. In: René M, Ambrosino G A, Bahariya G E (eds). *Geochemistry*. IntechOpen. doi: 10.5772/intechopen.87688.

(责任编辑 张西娟; 英文审校 刘贺娟)