

四川盆地中二叠统茅口组构造-岩相古地理特征 及有利储集区带分布*

文 龙¹ 罗 冰¹ 杨文杰^{2,3} 陈 晓¹ 张本健¹
许 强² 李明隆² 肖 笛² 乔占峰⁴ 谭秀成²

1 中国石油西南油气田公司, 四川成都 610051

2 中国石油集团碳酸盐岩储层重点实验室西南石油大学研究分室, 四川成都 610500

3 中国石化勘探分公司, 四川成都 610041

4 中国石油杭州地质研究院, 浙江杭州 310023

摘 要 中二叠世是四川盆地重要的构造转换期, 因该时期多种构造共同作用, 造成茅口组岩相古地理特征尚不明确, 从而制约了有利储集相带预测。本研究通过对露头、钻井及地震资料的分析, 厘清四川盆地茅口组沉积相类型, 重建其构造-岩相古地理格局及演化过程。研究表明: (1) 四川盆地茅口组主要发育 8 种岩石微相和 9 类典型微相组合序列, 结合古生物、沉积构造等相标志, 识别出碳酸盐岩缓坡和镶边碳酸盐岩台地 2 种沉积体系; (2) 茅口组沉积时期主要分为 3 个构造-沉积演化阶段: (i) 海西早期继承性古隆起发育期 (SQ1-SQ2), 四川盆地具有“西南高、东北低”的缓坡地貌格局, 发育稳定的碳酸盐岩缓坡沉积环境, 围绕川西南古隆起发育多带迁移性薄滩体; (ii) 川北持续伸展期 (SQ3-SQ5), 勉略洋向北俯冲形成 3 期后撤式多级坡折带, 导致川北地区逐级沉降为深水盆地, 四川盆地出现显著的台-盆分异格局, 沉积体系开始向镶边碳酸盐岩台地转变; (iii) 地幔柱隆升-拉张期 (SQ6), 扬子西南缘峨眉山地幔柱隆升产生的远端拉张作用导致川西南拗陷带形成, 这进一步加剧了四川盆地南部台地的分异, 造成川西南地区向台内洼地演变; (3) 茅口组孔洞型白云岩储集层和岩溶孔隙型灰岩储集层的分布均受古地貌和高能滩相控制, 台缘滩和台内滩是茅口组储集层发育有利区带, 其中后撤式多级坡折带控制的多期台缘滩带、环海西早期继承性古隆起的带状滩体、伸展背景下平行带状展布的台内滩带是茅口组滩相储集层的有利发育区。该研究重建了茅口组等时层序格架下的构造-岩相古地理格局, 揭示有利储集相带分布规律, 为茅口组油气规模发现提供方向。

关键词 构造-岩相古地理 沉积演化 有利储集区 茅口组 二叠系 四川盆地

第一作者简介 文龙, 男, 1977 年生, 博士, 高级工程师, 主要从事天然气勘探地质综合研究及管理工
作。E-mail: wenlong@petroChina.com.cn。

通讯作者简介 谭秀成, 男, 1970 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事碳酸盐岩沉积学与储层地质学研
究。E-mail: tanxiucheng70@163.com。

中图分类号: TE121 文献标志码: A

Tectonic-lithofacies palaeogeographic characteristics and distribution of favorable reservoir zones of the Middle Permian Maokou Formation

* 国家自然科学基金与中石油联合基金重点项目 (编号: U23B20154), 国家自然科学基金面上项目 (编号: 42172166), 中国石油-西南石油大学创新联合体科技合作项目 (编号: 2020CX010000) 共同资助。[Co-funded by the Key Project of the National Natural Science Foundation of China and the CNPC Joint Fund (No. U23B20154), and the General Project of the National Natural Science Foundation of China (No. 42172166), and the Science and Technology Cooperation Project of the CNPC-Southwest Petroleum University Innovation Consortium (No. 2020CX010000)]

收稿日期: 2025-02-14 改回日期: 2025-03-15

in Sichuan Basin, China

WEN Long¹ LUO Bing¹ YANG Wenjie^{2,3} CHEN Xiao¹ ZHANG Benjian¹
XU Qiang² LI Minglong² XIAO Di² QIAO Zhanfeng⁴ TAN Xiucheng²

¹ PetroChina Southwest Oil and Gas Field Company, Chengdu 610051, China

² CNPC Key Laboratory of Carbonate Reservoirs Southwest Petroleum University Division, Chengdu 610500, China

³ SINOPEC Exploration Company, Chengdu 610041, China

⁴ Hangzhou Research Institute of Geology, PetroChina, Hangzhou 310023, China

Abstract The Middle Permian represents a crucial phase of structural transformation in the Sichuan Basin. Under the cumulative effects of various structural activities, the lithofacies palaeogeographic attributes of the Maokou Formation remain ambiguous, thereby hindering the prediction of favorable reservoir facies belts. By analyzing outcrop, drilling and seismic data, the sedimentary facies types of the Maokou Formation in the Sichuan Basin are clarified and the tectonic-lithofacies palaeogeographic pattern along with its evolution process are reconstructed. The results show that: (1) Eight types of rock microfacies and nine typical microfacies assemblage sequences have been identified in the Maokou Formation. Two sedimentary systems, specifically carbonate gentle slopes and marginal carbonate platforms, have been distinguished by integrating palaeontological and sedimentary tectonic markers. (2) The Maokou Formation underwent three stages of tectono-sedimentary evolution: the early Hercynian inheritable palaeouplift controlled the “southwest high and northeast low” landform pattern of the early Maokou (SQ1 – SQ2), leading to the development of a stable carbonate gentle slope sedimentary environment, and the formation of a multi-zone migration thin beach body around the southwest Sichuan palaeouplift. Continuous extension in northern Sichuan resulted in the formation of a recessional multistage slope break zone, which led to significant platform-to-basin differentiation in the northern and southern parts of the basin, thereby directly controlling sedimentary differentiation during the middle and late Maokou (SQ3 – SQ5). The sedimentary system transitioned into a marginal carbonate platform, with sedimentary facies zones exhibiting distinct northeast zoning characteristics. The uplift and stretching of the Emei plume led to the development of the southwest Sichuan depression belt, further intensifying the differentiation of the late Maokou (SQ6) platform, and causing the southwest Sichuan region to evolve into an inner depression. (3) The distribution of cavern dolomite reservoirs and karst pore limestone reservoirs in the Maokou Formation is controlled by sedimentary palaeogeomorphology and high-energy beach facies. The platform edge beach and inner beach facies represent favorable zones for reservoir development within the Maokou Formation. Key regions for the development of beach facies reservoirs include the platform margin beach zone in the Maokou Formation controlled by the retreating multistage slope break zone; the belt beach body surrounding the early inheriting paleo-uplift in the western rim; and the inner platform beach zone, which is distributed in parallel belts under an extensional setting. This study reconstructs the tectono-lithofacies palaeogeographic pattern of the Maokou Formation within a chronostratigraphic sequence framework, reveals the distribution patterns of favorable reservoir facies belts, and provides guidance for large-scale oil and gas discoveries in the Maokou Formation.

Key words tectono-lithofacies palaeogeography, sedimentary evolution, favorable reservoir zone, Maokou Formation, Permian, Sichuan Basin

About the first author WEN Long, born in 1977, holds a Ph.D. degree and is a senior engineer.

He is mainly engaged in comprehensive geological research and management of natural gas exploration. E-mail: wenlong@petroChina.com.cn.

About the corresponding author TAN Xiucheng, born in 1970, is a professor and Ph.D. advisor of Southwest Petroleum University. He is mainly engaged in researches on carbonate sedimentology and reservoir geology. E-mail: tanxiucheng70@163.com.

四川盆地茅口组岩相古地理研究始于 20 世纪 80 年代, 早期研究认为茅口期是四川盆地二叠纪期间相对稳定的时期, 盆地内均为浅水碳酸盐岩台地沉积环境, 盆地周缘也不存在大型古陆 (刘宝珺等, 1986; 四川油气区石油地质志编写组, 1989; 冯增昭等, 1996)。也有学者认为茅口期主要为稳定的碳酸盐岩缓坡沉积环境 (陈宗清, 2007; 赵宗举等, 2012; 张庄等, 2023)。然而, 随着资料的不断丰富, 尤其是川北地区深水海槽证据的发现 (张玺华等, 2019; 王兴志等, 2021), 揭示出四川盆地茅口期古地貌不同于栖霞期北西分带的特征, 表现出显著的北东分带, 具有“北裂陷, 南台地”的特征 (周进高等, 2016; 张玺华等, 2019; 钟原等, 2021)。显然, 茅口期是四川盆地重要的构造转换期, 盆地演化表现为从栖霞期的北西向拉张向茅口期北东向拉张转变。对这一关键构造转换期的盆地沉积演化过程一直存在较大争议 (杨雨等, 2023), 目前主要存在 3 种观点, 分别是镶边台地 (钟原等, 2021; 彭金宁等, 2023)、缓坡台地 (赵宗举等, 2012; 张庄等, 2023) 和早期缓坡与晚期镶边台地 (钟怡江等, 2014; Yang *et al.*, 2024)。

随着四川盆地茅口组勘探研究工作不断深入, 近年来在四川盆地演化的构造动力学机制、层序地层格架搭建、关键构造变革及其不整合界面识别、古地貌重建、储集层成因机理分析等方面取得了诸多进展 (谭秀成等, 2025; 许强等, 2025)。尤其是“后撤式多级坡折带控制茅口组隆坳分异格局”这一观点的提出 (许强等, 2025), 突破了对茅口组古地理格局多年来的传统认识, 为四川盆地茅口组岩相古地理重建以及有利储集相带分布预测提供了新思路。

鉴于此, 本研究基于四川盆地茅口组 1079 口钻井、20 条实测野外露头剖面 and 近百口井的岩心、岩屑资料, 在茅口组沉积期区域构造演化及构造-古地貌单元分异规律的指导下, 构建等时层序地层

格架, 厘清层序充填演化过程, 重建构造-岩相古地理格局, 并聚焦有利储集区带分布, 以期为茅口组进一步的规模油气发现提供方向。

1 古地理背景

1.1 古构造特征

四川盆地位于华南板块西北部。二叠纪, 华南板块为古特提斯洋中漂移的孤立台地, 北侧为勉略洋, 东临广阔的古太平洋, 西南侧以金沙江-哀牢山洋为界与印支、羌塘地块隔海相望, 西临甘孜-理塘洋。华南板块在向北漂移过程中与这些大洋或板块相互作用, 构建了华南地区二叠纪古地理格局和地球动力学演化过程 (Xu *et al.*, 2019; Dong *et al.*, 2022)。与特提斯域内其他含油气盆地经历的单向伸展与挤压并形成叠合盆地不同 (吴福元等, 2020), 位于特提斯东段的华南板块二叠纪-三叠纪受到多向特提斯俯冲消减的构造控制 (Huang *et al.*, 2018), 形成复杂的盆地横向复合和垂向叠置。

最新研究表明, 中二叠世四川盆地经历了多种复杂构造活动, 总体上可以划分为 3 个构造演化阶段。(1) 海西早期继承性古隆起阶段: 海西早期 (泥盆纪-石炭纪) 的古隆起主要分布在乐山-龙女寺一带, 为四川盆地二叠纪沉积奠定了地貌基础 (梅庆华等, 2014); 早二叠世末期-中二叠世初期, 华南板块西南的金沙江-哀牢山洋向北俯冲, 造成四川盆地西南缘产生强烈的挤压抬升, 继承性古隆起持续发育并控制中二叠世初期构造古地貌, 进一步强化了茅口初期四川盆地“西南高、北东低”的北倾缓坡地貌特征 (图 1-a) (许强等, 2025)。(2) 勉略洋俯冲与川北持续伸展阶段: 这是茅口中中期最显著的构造活动, 表现为古特提斯洋分支洋盆勉略洋向北俯冲加速, 四川盆地北缘形成被动大陆边缘环境, 川北地区发育 3 期后撤式多级坡折带并控制着四

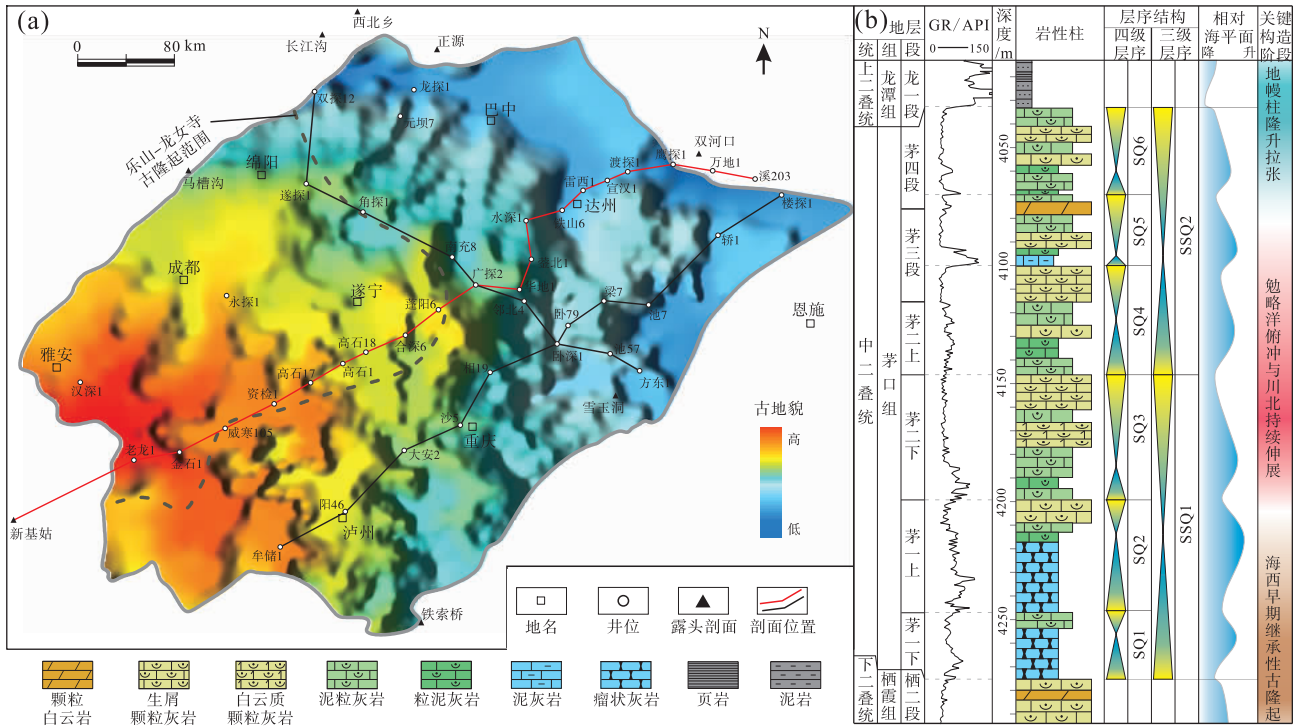


图 1 四川盆地茅口组沉积初期 (SQ1-SQ2) 古地貌 (a, 据许强等, 2025) 与茅口组层序地层综合柱状图 (b)

Fig. 1 Paleogeomorphology in the early sedimentary period of the Maokou Formation (SQ1-SQ2) in Sichuan Basin (a, according after Xu *et al.*, 2025) and the sequence strata comprehensive column of the Maokou Formation (b)

川盆地南北台盆分异的地貌格局 (许强等, 2025)。(3) 地幔柱隆升拉张阶段: 中二叠世晚期峨眉山地幔柱隆升是四川盆地重要的构造活动 (罗志立等, 1988), 不仅导致地幔柱中心区出现大幅隆升 (何斌等, 2005), 而且地幔柱的远端拉张效应还造成四川盆地西南部形成环隆弧形坳陷 (许强等, 2025)。由此可见, 四川盆地中二叠世具有复杂的构造背景, 南西向和北东向双向构造应力以及地幔柱隆升拉张效应导致茅口组沉积演化过程异常复杂 (图 1-b)。

1.2 层序地层特征与充填规律

四川盆地茅口组主要发育 2 个三级层序 (SSQ1-SSQ2) 和 6 个四级层序 (SQ1-SQ6) (许强等, 2025), 其中 6 个四级层序分别与茅一下亚段、茅一上亚段、茅二下亚段、茅二上亚段、茅三段、茅四段等岩石地层单元大致对应。相较于传统的岩石地层单元, 四级层序与沉积旋回具有良好的对应关系 (图 1-b), 更能反映完整的海侵-海退沉积旋回。

茅口组全盆地等时层序地层对比表明, SQ1-

SQ2 层序受海西早期继承性古隆起控制, 地层展布整体呈“西南薄、东北厚”, 具有自北向南渐次上超的沉积充填特征 (图 2-a, 2-b)。从 SQ2 末期开始, 川北伸展作用开始活跃, 四川盆地东北部开始发生沉降, 鹰探 1 井附近形成第 I 期坡折带 (图 2-b)。SQ3 时期, 第 II 期坡折带向南迁移至渡探 1 井附近, 导致 SQ3 层序总体具有“南厚北薄”的展布特征 (图 2-c)。SQ4 初期, 区域伸展作用进一步加强, 第 III 期坡折带进一步向南迁移至水深 1 井附近, 造成盆地北部大面积沉降、水体加深, 茅口中晚期“南高北低、南厚北薄”的沉积格局基本定型 (图 2-d)。SQ6 层序受峨眉山地幔柱隆升拉张形成的川西南坳陷影响显著, 从川西南坳陷向川南-川中地区持续超覆减薄, 导致川西南地区的 SQ6 沉积厚度最大; 在盆地北部, SQ6 具有向海方向前积充填特征, 斜坡带沉积厚度相对较大 (图 2-e)。就整个茅口组层序充填规律演化而言, 向南后撤式迁移的 I~III 期多级坡折带的发育是控制茅口组各四级层序厚薄分异和充填过程的关键。

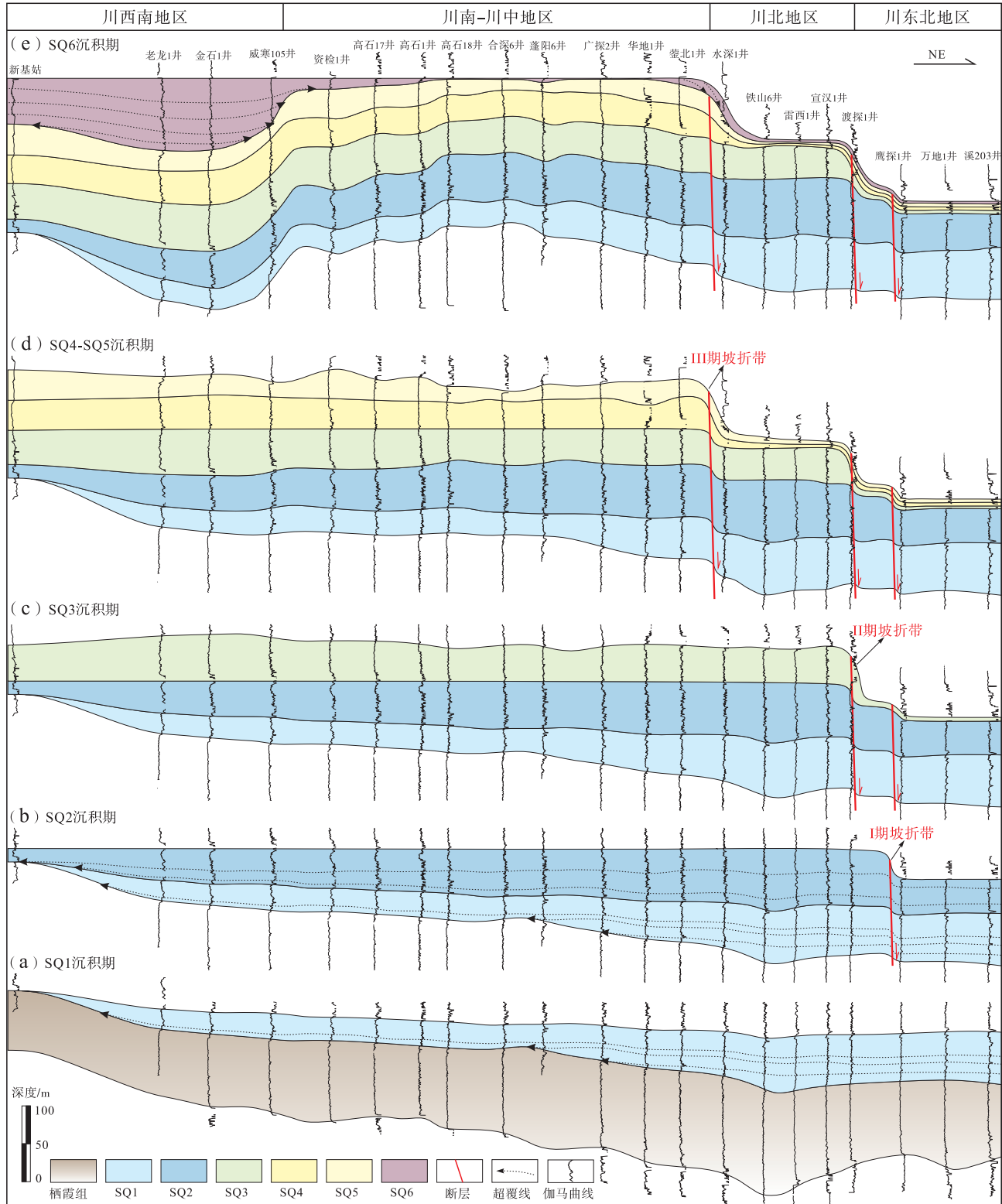


图 2 四川盆地中二叠统茅口组层序充填演化剖面 (剖面位置见图 1-a)

Fig. 2 Sequence filling evolution profile of the Middle Permian Maokou Formation in Sichuan Basin (the profile location is shown in Fig. 1-a)

2 岩石微相组合与沉积特征

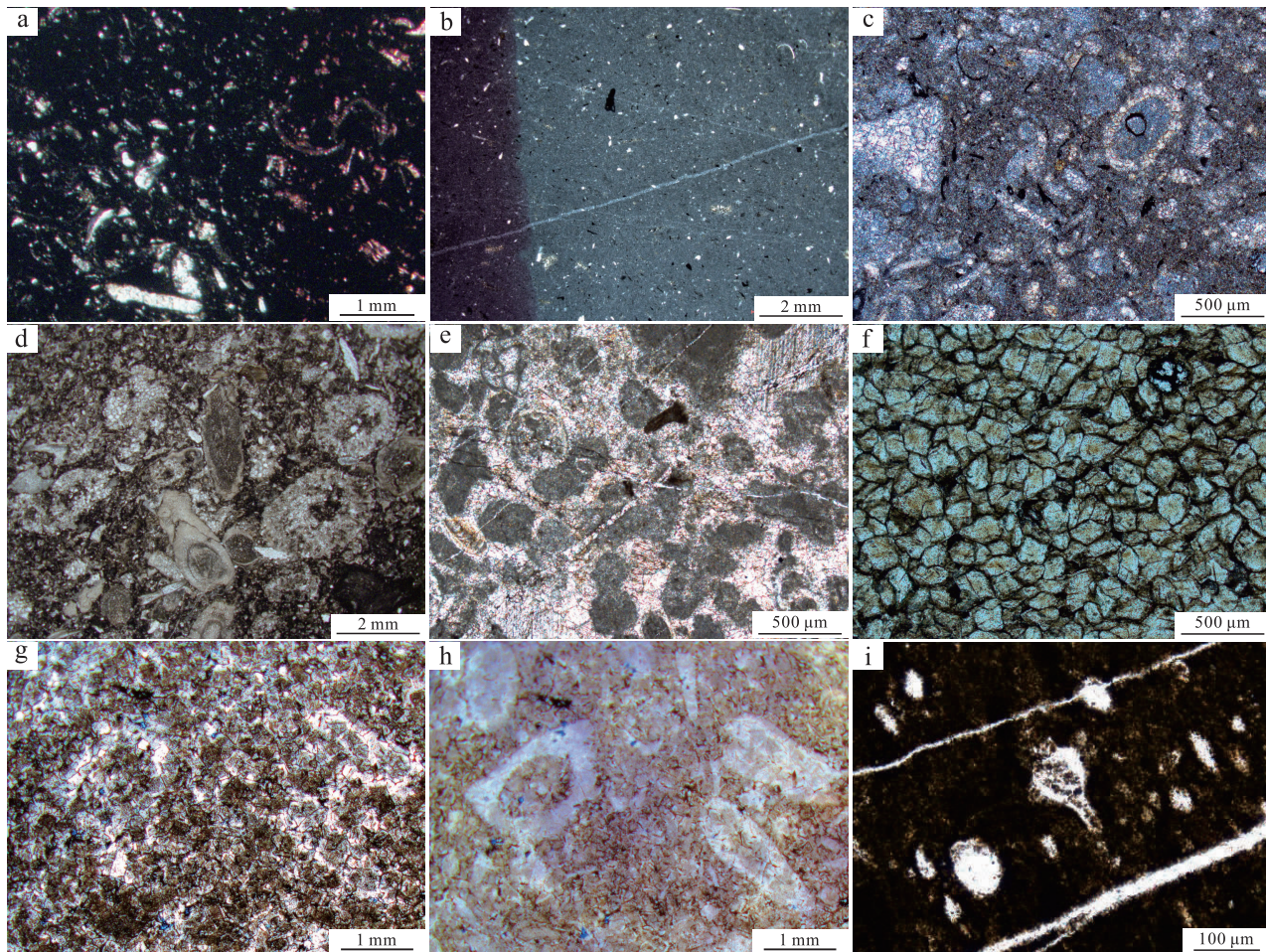
2.1 岩石微相类型及环境解译

碳酸盐岩的岩石组成、生物组合、显微结构等是划分其微相类型和分析沉积环境的重要依据。本研究根据茅口组大量露头和岩心宏观、微观观察描述，并参考碳酸盐岩标准微相类型 (Flügel, 2010)，将四川盆地茅口组碳酸盐岩归纳为 8 种主要的岩石微相类型。

1) 泥灰岩 (MF1)。多见于 SQ1-SQ2 层序，通常与石灰岩一起产出呈石灰岩—泥灰岩韵律层。宏观上，泥灰岩层颜色较石灰岩层更深，以灰黑色为主，呈薄层状，常见波状起伏的纹层，生屑具有定向排列特征。在镜下，泥灰岩中黏土含量高

(茜素红不染色)，见腕足类、有孔虫、介形虫等生物碎屑 (图 3-a)。沉积成因观点认为，泥灰岩与石灰岩的原始沉积物类型及其沉积环境存在差异 (Elder *et al.*, 1994)，有米兰科维奇旋回造成的碳酸盐产率 (薛武强等, 2015)、陆源输入程度 (Eldrett *et al.*, 2015)、上升流 (罗进雄和何幼斌, 2010) 以及事件沉积 (如重力流、风暴等) (刘宝珺等, 1986; 李双应等, 2008; 陆鹿等, 2014) 等多种成因。总体上，泥灰岩指示的沉积环境能量较低，大致可与标准岩石微相黏土质潜穴灰泥岩 (RMF2) 类比。

2) 泥晶灰岩 (MF2)。宏观上，多为灰黑色中—薄层状产出，整体致密无孔。在镜下，灰泥含量超过 90%，可见少量生物碎屑，含量小于 10%，且



a—泥灰岩，新基姑剖面，7-1，部分染色薄片，单偏光；b—泥晶灰岩，铁索桥剖面，20-1，部分染色薄片，单偏光；c—生屑粒泥灰岩，成 20 井，3460.4 m，单偏光；d—生屑泥粒灰岩，新基姑剖面，121-1，单偏光；e—生屑颗粒灰岩，池 67 井，3286.96 m，单偏光；f—细—粉晶白云岩，潼深 3 井，4334.75 m，单偏光；g—中—细晶白云岩，潼深 11 井，4447.31 m，单偏光；h—图 3-g 对应原岩恢复照片，见大量残余生屑颗粒幻影结构；i—硅质泥页岩，见放射虫，双河口剖面，单偏光 (据曹华等, 2024)

图 3 四川盆地中二叠统茅口组典型岩石微相显微特征

Fig. 3 Microscopic characteristics of typical rock microfacies in the Maokou Formation, Sichuan Basin

多以粉屑级为主, 仅有少部分保存完整(图 3-b)。该岩类颗粒含量极少, 以低能的灰泥为主, 生物类型单一, 与标准岩石微相均质无生物泥晶灰岩(SMF23)相似, 主要指示低能沉积环境, 如盆地或台内洼地等环境。

3) 生屑粒泥灰岩(MF3)。灰泥含量相对较高, 一般大于 50%, 生屑颗粒含量较少, 因此多见生屑“漂浮”于灰泥之中, 局部见生屑颗粒呈点接触支撑。生物碎屑类型较泥晶灰岩更加丰富, 以有孔虫、腕足类、棘皮类、藻类等为主, 但分选性、磨圆度总体较差(图 3-c)。该岩类生物碎屑保存完整或破碎, 大小不一, 不均匀分布在灰泥基质中, 可与标准微相含完整化石颗粒灰岩(SMF8)类比, 主要发育在晴天浪基面之下的低能沉积环境。

4) 生屑泥粒灰岩(MF4)。生物碎屑含量高, 介于 50%~80%之间, 以藻类、棘皮类、有孔虫、腕足类、腹足类等为主, 大小为 0.1~2 mm, 分选一般, 磨圆稍好, 以点一线接触为主, 粒间充填的灰泥基质含量一般低于 40%(图 3-d)。生屑泥粒灰岩中生物化石丰富, 指示富氧、温暖、养分充足的水体环境。生屑颗粒未遭受强烈的波浪作用颠选和搬运, 很少发育亮晶胶结物, 可与标准微相含有包壳和磨蚀骨粒的生屑灰泥质颗粒灰岩(SMF10)类比, 主要发育在浪基面附近生物繁盛的中一低能环境。

5) 生屑颗粒灰岩(MF5)。宏观上, 多呈浅灰色厚层一块状产出, 肉眼可见灰黑色生屑颗粒。显微镜下, 岩石组分以生屑颗粒为主, 含量大于 70%, 大小多介于 0.2~0.5 mm 之间; 生屑普遍具有磨蚀及包壳特征, 分选、磨圆程度高, 泥晶化作用强烈; 颗粒间被方解石胶结, 胶结物含量一般在 20%~40%之间(图 3-e)。生屑颗粒灰岩的颗粒分选性和磨圆度较好, 粒间均被亮晶方解石胶结, 反映其形成于浪基面之上具有恒定波浪作用的高能沉积环境, 可与标准微相含有亮晶胶结物的包壳生屑颗粒灰岩(SMF11)类比。

6) 细-粉晶白云岩(MF6)。宏观上, 主要呈深灰色一灰色薄层状产出, 整体致密无孔, 上下相邻岩性多以泥晶灰岩、泥灰岩、生屑粒泥灰岩为主。在镜下, 白云石晶体大小一般为 60~120 μm , 以细-粉晶为主, 自形-半自形(图 3-f)。细-粉晶

白云岩局部见未完全白云石化的泥晶灰岩、泥灰岩等基质灰岩, 而基质灰岩可以反映原始沉积物及沉积环境, 指示相对低能的沉积环境。

7) 颗粒白云岩(MF7)。主要指具残余颗粒幻影结构的晶粒白云岩, 宏观上颗粒白云岩以中一厚层为主, 见大量生屑颗粒, 且溶洞、溶沟较发育。在镜下, 白云石晶体粒径主要介于 150~300 μm 之间, 以中-细晶为主, 呈他形-半自形(图 3-g)。原岩恢复后残余生屑颗粒幻影结构明显, 晶间孔发育, 主要继承原始灰岩中的铸模孔、粒内溶孔和粒间孔(图 3-h)。部分白云岩的白云石化作用较为彻底, 交代残余颗粒结构不明显。此外, 该类白云岩上、下相邻岩性多以生屑颗粒灰岩和生屑泥粒灰岩为主, 反映颗粒白云岩的原始沉积物发育在较高能的沉积环境中。

8) 硅质泥页岩(MF8)。宏观上多呈黑色薄层状产出, 显微镜下以黑色富有机质黏土矿物为主, 硅质组分含量较高。水平状和网状裂缝发育, 裂缝中多充填方解石。硅质泥页岩中生屑含量低且类型单一, 可见少量深水相硅质放射虫和海绵骨针(图 3-i), 主要指示水体能量极低的深水、还原环境。

2.2 沉积相类型及特征

依据茅口组岩石微相及其序列组合特征, 结合茅口组各层序充填规律, 认为茅口组具有“早期缓坡、中后期镶边台地”的沉积特征。碳酸盐岩缓坡沉积体系可划分为内缓坡、中缓坡、外缓坡 3 类沉积相及若干亚相, 镶边碳酸盐岩台地沉积体系可划分为半局限台地、台地边缘、斜坡、盆地 4 类沉积相及若干亚相(表 1)。

2.2.1 碳酸盐岩缓坡体系

茅口初期古地貌呈“西南高、北东低”, 为向北平缓倾斜的均斜缓坡(许强等, 2025)(图 1-a)。在这一地貌基础上, 川西南地区浅水生物类型最为丰富, 发育古串珠虫、翁格达藻等生物组合, 向川北东方向生物类型和丰度逐渐减少(杨巍等, 2014), 并以单调的二叠纪钙藻组合为特征(山克强和孟晓荣, 2022), 指示向北水体逐渐加深的特征。另外, 自川西南向川东北, Ba、Sr、V、Cu 等微量元素的丰度逐渐增大, 表明自川西南向川东北具有从氧化环境向还原环境变化的趋势(杨巍等,

表 1 四川盆地中二叠统茅口组沉积相划分方案

Table 1 Sedimentary facies division scheme of the Middle Permian Maokou Formation in Sichuan Basin

沉积体系	相	亚相	主要岩性	发育时期
碳酸盐岩缓坡	内缓坡	颗粒滩	颗粒(云)灰岩、泥粒灰岩	SQ1-SQ2
		泻湖	泥灰岩、泥晶灰岩、粉晶白云岩	
		半局限海	粒泥灰岩、泥粒灰岩、泥晶灰岩	
	中缓坡	颗粒滩	泥粒灰岩、颗粒灰岩	
		开阔海	粒泥灰岩、泥晶灰岩、泥灰岩	
		风暴滩	泥粒灰岩、颗粒灰岩	
	外缓坡	静水泥	泥晶灰岩、硅质泥页岩	
镶边碳酸盐岩台地	半局限台地	台内滩	颗粒(云)灰岩、泥粒灰岩	SQ3-SQ6
		台内洼地	泥灰岩、泥晶灰岩	
		半局限海	粒泥灰岩、泥粒灰岩、泥晶灰岩	
	台地边缘	台缘滩(礁)	颗粒(云)灰岩、生物礁(云)灰岩	
		滩间	粒泥灰岩、泥灰岩	
		斜坡	泥粒灰岩、粒泥灰岩、泥灰岩	
	盆地	泥晶灰岩、硅质页岩		

2014)。综合四川盆地茅口组沉积前古地貌、茅口初期生物组合和氧化还原环境变化等特征，认为四川盆地茅口早期主要发育碳酸盐岩缓坡沉积体系，依据岩相组合序列差异可识别出内缓坡、中缓坡、外缓坡等沉积相。

2.2.1.1 内缓坡

内缓坡主要位于平均海平面至晴天浪基面之间，整体水体浅、能量高，但能量变化较大。

内缓坡微地貌高地水体能量通常最高，尤其是靠近浪基面附近的内缓坡外带，是颗粒滩发育的有利部位。通常颗粒滩沉积能量较高，主要发育泥粒灰岩、颗粒灰岩等微相，并且以多期薄层叠置的泥粒灰岩—颗粒灰岩微相组合序列为特征，旋回末期可能发生准同生白云石化作用，导致序列顶部偶见颗粒白云岩(图 4-a)。

半局限海亚相主要发育在颗粒滩之间地貌相对平坦或低洼的区域，水体能量相对较弱，颗粒含量较低，主要沉积生屑粒泥灰岩，其次为生屑泥粒灰岩和泥晶灰岩。沉积序列多以粒泥灰岩—泥粒灰岩为主(图 4-b)，垂向上与颗粒滩亚相频繁互层。此外，在内缓坡相对平静的环境中，可见大量直立或倾斜状生物潜穴(图 5-a)。

泻湖环境水体局限，能量较低，主要发育泥灰岩、泥晶灰岩、粒泥灰岩、细-粉晶白云岩等岩石微相，发育典型的泥晶灰岩—细-粉晶白云岩微相

组合序列(图 4-c)。这一向上变浅的微相组合序列指示低能、局限、蒸发的泻湖环境，其中准同生期海水蒸发浓缩导致石灰岩快速白云石化形成细-粉晶白云岩。

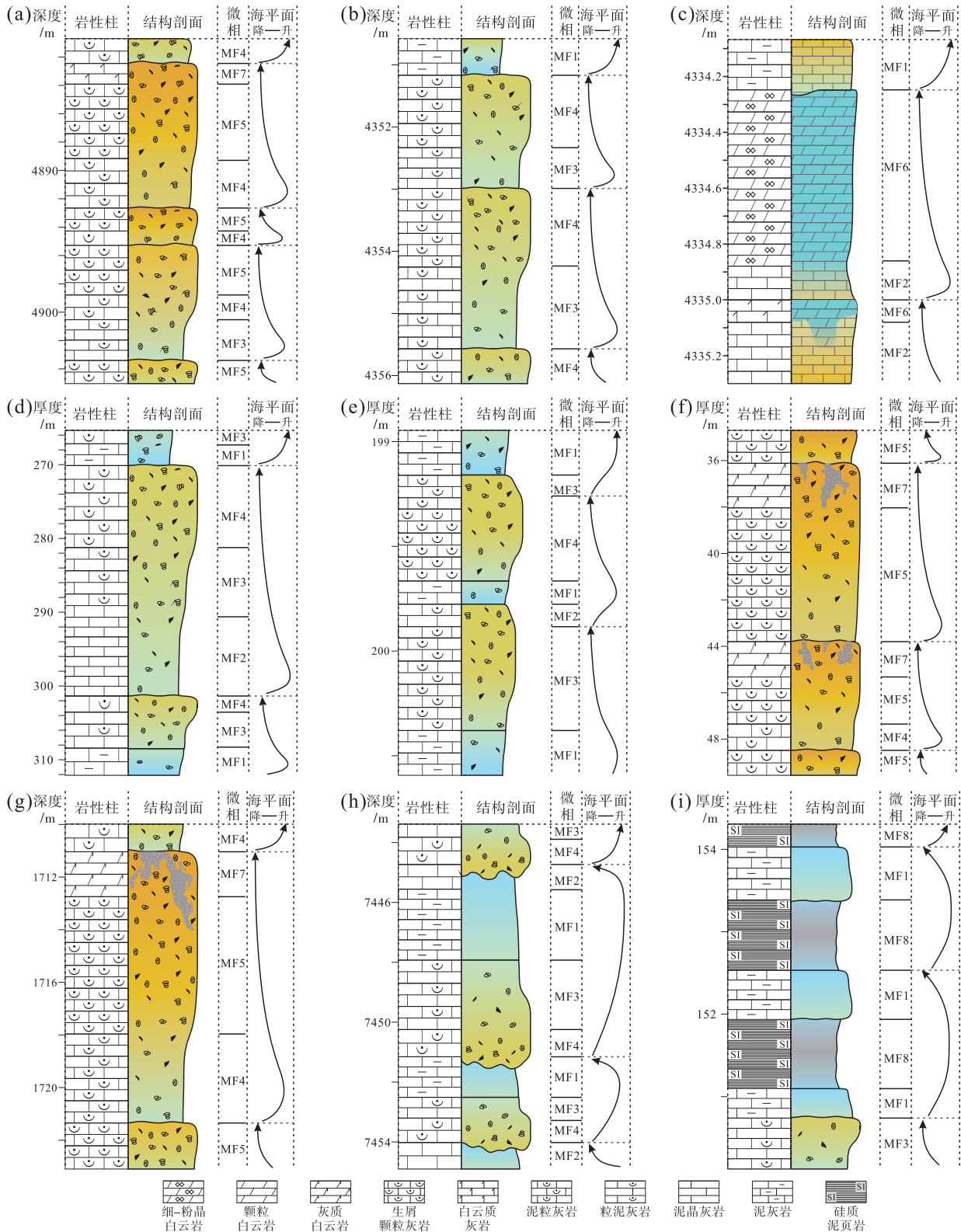
2.2.1.2 中缓坡

中缓坡发育于晴天浪基面至风暴浪基面之间的宽阔海底，相较于内缓坡水体更深，但仍处于透光带之上，适合藻类等生物的生长发育。

中缓坡内带靠近晴天浪基面的水下高地，易受海平面变化影响，水动力中等—较弱，有利于低能颗粒滩的发育。低能滩亚相主要发育生屑粒泥灰岩—泥粒灰岩组合序列(图 4-d)，但由于缺乏持续动荡的水动力条件，序列顶部少见颗粒灰岩。

开阔海亚相主要发育在低能滩之间的相对低地，整体受波浪作用影响较小，水体能量较弱。生屑含量较低，一般少于 40%，保存相对完整，分选性和磨圆度整体较差。主要以泥灰岩—石灰岩沉积序列为特征(图 4-e)，序列底部受海侵初期大规模海进影响，发育规模分布的层状低能泥灰岩(图 5-b)。此外，泥灰岩中偶见硅质生物，可能指示缓坡上升流的影响(田小彬等，2021)。

间歇性的风暴浪可影响至中缓坡海底，并对早期沉积物进行重新改造和分配，形成低缓丘状的风暴滩沉积。由于风暴浪具有偶发性，因此风暴滩垂向规模较小，多以薄层或透镜状分布于开阔海亚相



a—内缓坡颗粒滩沉积序列，汉深1井；b—内缓坡半局限海沉积序列，潼深3井；c—内缓坡潟湖沉积序列，潼深3井；d—中缓坡低能滩沉积序列，铁索桥剖面；e—中缓坡开阔海沉积序列，新基姑剖面；f—台缘滩沉积序列，雪玉洞剖面；g—台内滩沉积序列，威阳17井；h—斜坡沉积序列，剑阁1井；i—盆地沉积序列，西北乡剖面

图 4 四川盆地茅口组典型沉积序列

Fig. 4 Typical sedimentary sequence of the Maokou Formation in Sichuan Basin

中。风暴滩岩性主要为泥粒灰岩和粒泥灰岩，生屑大小不均匀，分选差，可见正粒序层理(图 5-c)。露头上茅口组下部缓坡相多见丘状交错层理及浪成交错层理，其中丘状交错层理是风暴事件形成的特征沉积构造，呈孤立的宽缓丘状，而浪成交错层理则反映了风暴流摆动的强度和频次(田小彬等, 2021)。受风暴浪的多向涡流冲刷，石灰岩顶部可见不规则但较为圆滑的冲刷面(图 5-d)。

2.2.1.3 外缓坡

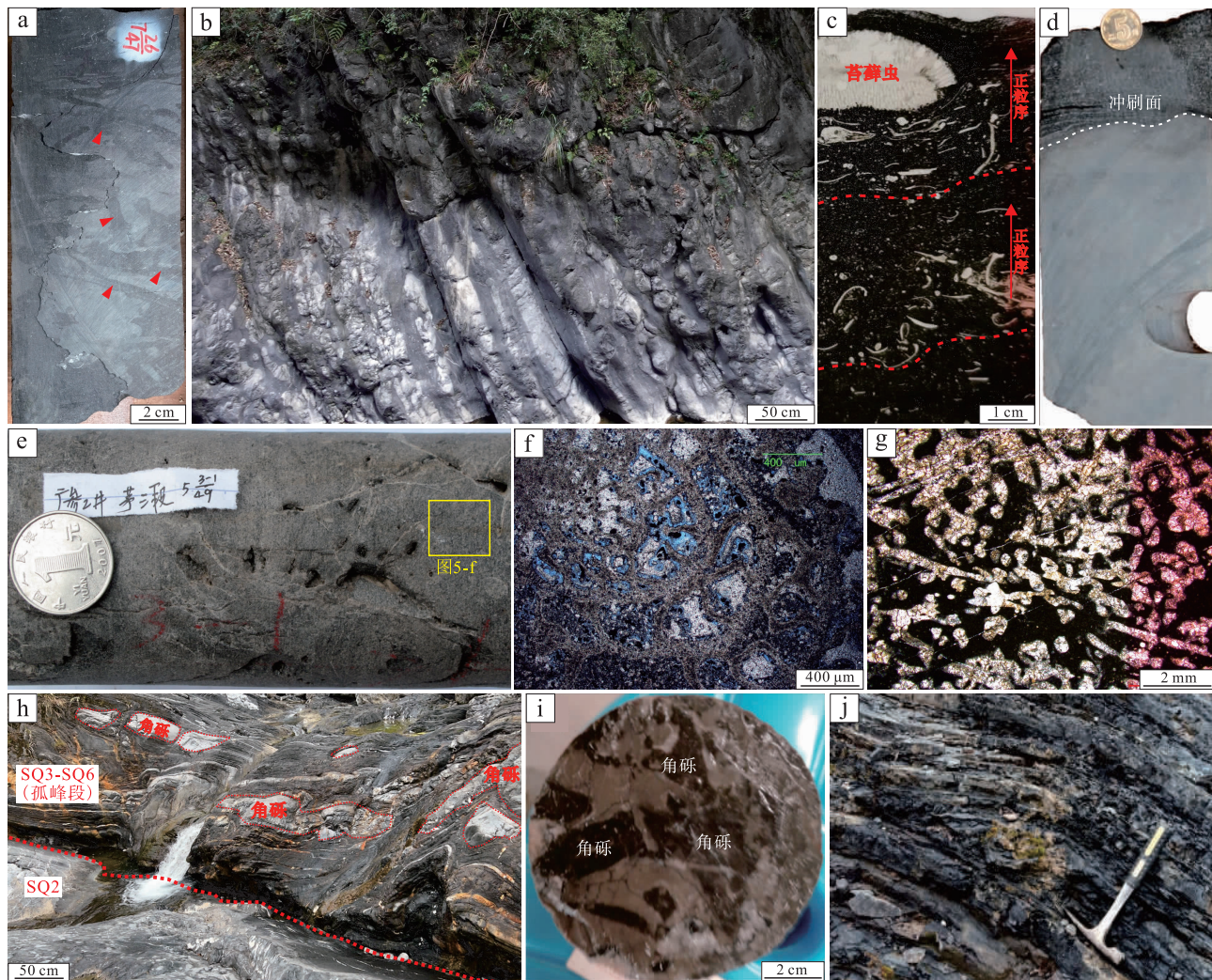
外缓坡发育于风暴浪基面之下的深水区域，几乎不受波浪作用影响，以低能的碳酸盐沉积为主，沉积厚度较小。外缓坡主要发育泥晶灰岩、泥灰岩

等低能岩石微相，生物碎屑较少，主要包括小型有孔虫、海绵骨针、介形虫、钙质微生物(图 3-i)。外缓坡在四川盆地发育范围十分有限，主要分布在川东北—鄂西一带(万秋和李双应, 2011)。

2.2.2 镶边碳酸盐岩台地体系

2.2.2.1 台地边缘

茅口中晚期，由伸展作用控制的多级坡折带发育背景(许强等, 2025)为台地边缘的形成奠定了地貌基础。台地边缘相是区别镶边台地和缓坡的典型标志之一，因长期处于较强的水动力条件下，通常发育带状、连续的高能台缘滩。台缘滩亚相以生屑颗粒灰岩和颗粒白云岩为主，可见造礁生物



a—生物潜穴构造，靖和 1 井；b—灰岩—泥灰岩韵律层，双河口剖面；c—黑色风暴岩，见异地搬运的苔藓虫碎屑，具正粒序，剑阁 1 井，7441.85 m；d—冲刷面构造，合平 1 井，4257.95 m (据田小彬等, 2021)；e—生物礁白云岩，广参 2 井，4608.65~4608.80 m；f—生物礁白云岩，生物体腔孔发育，广参 2 井，4608.77 m；g—生物礁灰岩，马槽沟剖面；h—浅灰色滑塌角砾灰岩定向分布于黑色硅质页岩中，双河口剖面 (据许强等, 2025)；i—滑塌角砾灰岩，元坝 8 井 (据邓莉等, 2021)；j—黑色薄层状硅质泥页岩，西北剖面

图 5 四川盆地茅口组沉积相标志宏微观特征

Fig. 5 Macroscopic and microscopic characteristics of sedimentary facies markers in the Maokou Formation, Sichuan Basin

(图 5-e, 5-f, 5-g), 以多期叠置的颗粒灰岩—颗粒白云岩微相组合序列为特征(图 4-f), 反映其稳定、高能的沉积环境。同时, 位于地貌高地的台缘滩容易遭受暴露溶蚀, 造成该序列顶部往往具有明显的溶蚀现象(图 4-f)。

台缘滩间亚相主要发育在台缘滩之间相对低洼的区域, 因受台缘滩的遮挡而水体受限, 能量较低, 主要发育泥粒灰岩和粒泥灰岩。当台缘滩围陷程度高、海水循环局限时, 可形成局限的还原环境, 发育黑色富有机质泥灰岩。

2.2.2.2 半局限台地

由于受到台缘滩和台内局部隆起的障壁作用, 台地内水体循环受到一定程度限制, 海水盐度比正常海水高, 形成半局限台地环境。

台内滩亚相发育于浪基面之上的微地貌高地, 是半局限台地中水动力条件最强的沉积环境, 主要发育粒泥灰岩—泥粒灰岩—颗粒灰岩—颗粒白云岩组合序列(图 4-g)。受沉积旋回末期海平面下降导致的准同生期白云石化作用影响, 旋回顶部多见层状颗粒白云岩发育。

半局限海位于半局限台地浪基面之下的平坦环境。其沉积特征与缓坡中的半局限海类似, 同样以粒泥灰岩—泥粒灰岩沉积序列为主(图 4-b), 反映较弱的沉积水动力条件。

台内洼地为半局限台地中的低洼区域, 受波浪作用影响小, 水体深度大、能量低。岩性主要为泥灰岩、泥晶灰岩和粒泥灰岩, 生屑含量总体较低, 一般保存较完整。通常发育泥灰岩—石灰岩组合序列(图 4-e)。

2.2.2.3 斜坡

斜坡位于台地边缘和深水盆地的过渡地带, 也是镶边台地与缓坡环境的重要区别标志之一。斜坡水体一般较深、水动力较弱, 主要发育泥晶灰岩、粒泥灰岩和泥灰岩; 当受到风暴浪作用影响时发育泥粒灰岩—粒泥灰岩—泥灰岩组合序列, 具有正粒序特征(蒋航等, 2023)(图 4-h)。因其地势陡峭常发生滑坡和垮塌作用, 因此除正常的深水细粒沉积之外, 来自上部台地边缘浅水环境的半固结、未固结沉积物也常搬运至此, 形成不规则角砾(图 5-h, 5-i)。在坡度较缓的地区, 泥晶灰岩中可见重力流作用带来的漂浮状杂乱排列的生屑团块(曹华等, 2024)。

2.2.2.4 盆地

盆地相整体处于风暴浪基面之下, 为极低能的环境, 以低能的硅质泥页岩(图 5-j)、泥灰岩或泥晶灰岩为主, 主要发育泥灰岩—硅质泥页岩组合序列(图 4-i)。盆地相位于透光层之下, 生物类型单一, 多为放射虫、海绵骨针等深水环境生物碎屑。

3 构造-岩相古地理演化

3.1 沉积相展布特征

哀牢山洋和勉略洋的双向俯冲作用, 加剧了四川盆地南北向的构造分异(许强等, 2025), 导致茅口组沉积相在北东向分带特征明显, 在北西—南东向上沉积相展布相对稳定。

海西早期继承性古隆起是控制茅口早期沉积古地貌的关键, 奠定了四川盆地西南高、北东低的地貌格局。受这一北倾缓坡地貌和中二叠世初期全球大规模海侵影响, 川北、川东等地貌低地水体快速加深, 沉积环境由内缓坡向中缓坡快速演变, 而川西南地貌高地主要以相对浅水的内缓坡环境为主, 仅在 SQ1 最大海泛面附近发育短期的中缓坡相。SQ2 总体继承 SQ1 沉积格局, 处于稳定的碳酸盐岩缓坡环境, 并随着海平面持续上升, 中缓坡沉积规模相对扩大。

至川北持续伸展期, 北东向拉张应力形成 3 期后撤式多级坡折带, 进一步加剧茅口组沉积相的北东向分带特征。川北初始伸展时(SQ2 末期), 形成规模相对较小的第 I 级坡折带, 导致川东北最早发生沉降, 沉积环境由均斜碳酸盐岩缓坡开始向远端变陡缓坡转变(图 6-a)。川北持续伸展早期(SQ3), 形成向南迁移的第 II 期坡折带, 在池 7—轿 1 井之间形成台地边缘带, 沉积环境整体向弱镶边碳酸盐岩台地过渡, 坡折带以南以台内滩和半局限海沉积为主, 以北的区域以斜坡—盆地相为主, 南北分异格局逐渐明显。川北持续伸展中期(SQ4), 北东向拉张作用强烈, 形成向南迁移的第 III 期坡折带, 盆地北东向分带特征最为显著, 自南向北依次发育半局限台地、台地边缘、斜坡、盆地等相带, 台内滩同样具有多排多带的分布特征(图 6-a)。川北持续伸展晚期(SQ5), 拉张作用整体减弱, 第 III 期坡折带稳定发育, 沉积期古地貌和古地理格局整体继承前

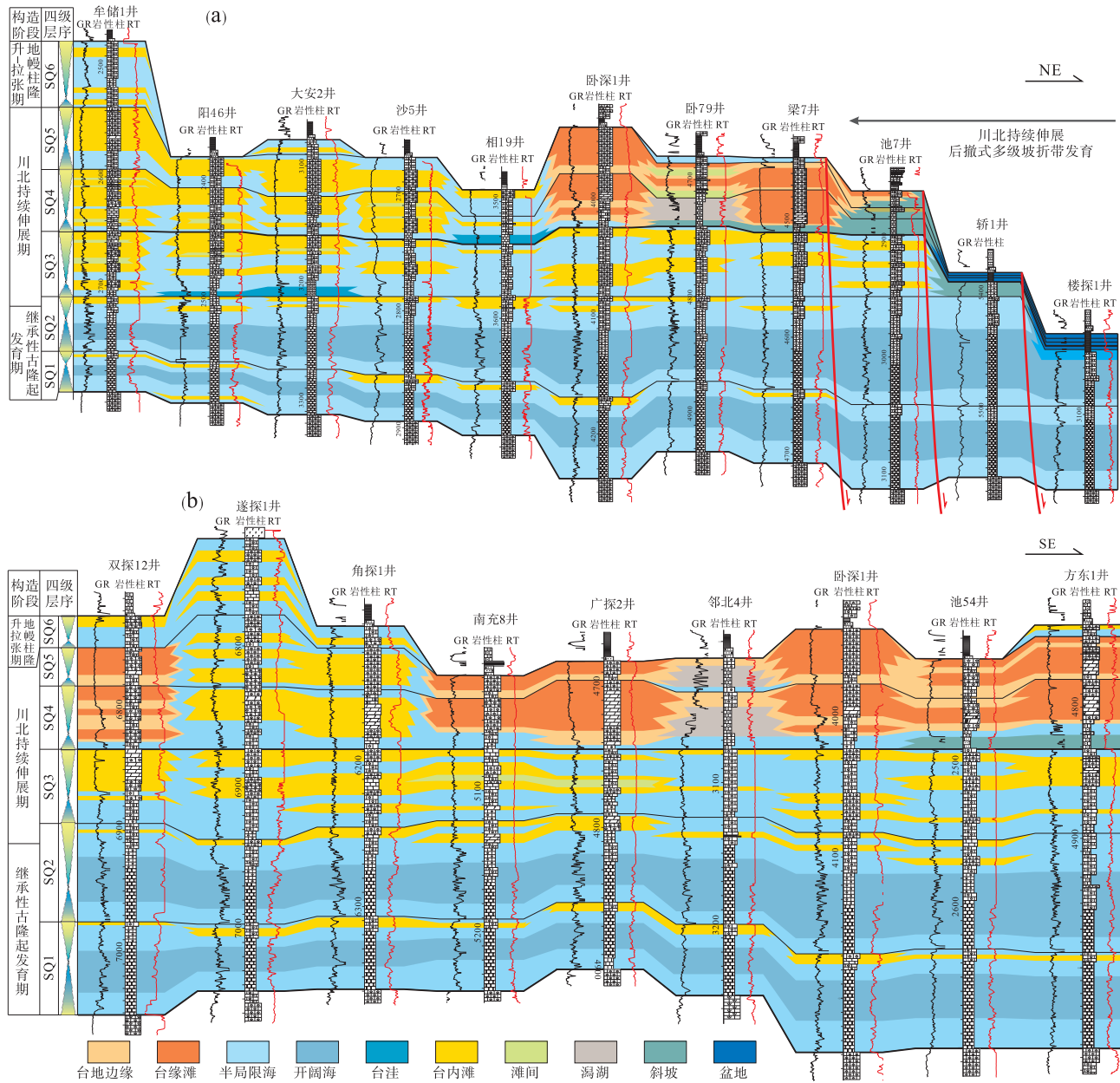


图 6 四川盆地茅口组层序及沉积相连井对比剖面 (剖面位置见图 1-a)

Fig. 6 Inter-well contrast profiles of sequence and sedimentary of the Maokou Formation in Sichuan Basin (the profile location is shown in Fig. 1-a)

期特征。因此，受第Ⅲ期坡折带稳定发育影响，茅口组形成规模性、北西—南东向展布的台缘滩沉积(图 6-b)。

峨眉山地幔柱隆升-拉张期(SQ6)，川西南地区逐渐拗陷形成台内洼地环境，向川中一线发育上超沉积充填层序。而在川北斜坡带，受中二叠世末期海退影响，台缘滩向前斜坡一带持续前积，具有斜坡—台缘滩频繁交互沉积特征(图 6-a)。

3.2 构造-岩相古地理及其演化

四川盆地中二叠世具有复杂的大地构造背景，茅口组沉积期主要受到海西早期继承性古隆起、勉略洋俯冲导致的川北持续伸展以及峨眉山大火成岩省等多个构造体系的影响(许强等, 2025)，盆地内出现后撤式多级坡折带、茅口组内幕火山岩、茅口末期川西南拗陷区等多种复杂的地表响应，从而直接控制了茅口组沉积演化过程。岩相古地理平面

图呈现的岩相特征和沉积环境是重建地质历史时期盆地构造-沉积演化的依据,为了恢复茅口组各时期构造-岩相古地理格局,本次研究基于点-线-面结合的研究思路,采用“单因素分析-多因素综合”的编图方法,编制具有沉积学意义的各类单因素平面图。在部分钻井资料少的地区,充分利用地震资料,依据邻区钻井沉积特征、地震相特征和沃尔索相序定律,预测相带展布规律,进而重建茅口组构造-层序-岩相古地理演化(图 7)。

3.2.1 海西早期继承性古隆起主导的缓坡发育阶段 (SQ1-SQ2)

四川盆地乐山-龙女寺古隆起在早古生代快速发展,先后经历了多期同沉积隆起和剥蚀过程,至海西早期强烈隆升剥蚀后古隆起形态趋于平缓并最终定型,在二叠纪进入稳定埋藏阶段(梅庆华等,2014)。大量研究揭示二叠纪初期四川盆地仍具有“西南高、北东低”的古地貌格局,表明海西早期乐山-龙女寺古隆起对四川盆地二叠纪沉积具有直接的控制作用。与此同时,二叠纪初期金沙江-哀牢山洋发生向北俯冲,造成四川盆地西南缘茅口组底部出现平行于金沙江-哀牢山缝合带的带状岛弧火山岩(Xiao *et al.*, 2024),且持续俯冲挤压导致四川盆地西南部大面积隆升,进一步强化了海西早期“西南高、北东低”的古地貌格局(许强等,2025)。川西南地区继承性古隆起在乐山-龙女寺古隆起形态基础上向南西迁移和初步解体,高地貌区向东延伸至泸州-重庆一带,绵阳-遂宁以北地区古隆起开始发生沉降,形成斜坡区(图 1-a)。

受海西早期继承性古隆起发育控制,茅口早期四川盆地形成北倾的巨型缓坡,在此地貌基础上自川西南向川东北依次发育内缓坡、中缓坡。此外,中二叠世初期全球海平面再次持续上升,导致中缓坡接受沉积的时间更早、沉积厚度大,而内缓坡沉积时间晚、厚度较小。同时,颗粒滩具有环川西南海西早期古隆起分布的规律,并随着海平面持续上升颗粒滩逐渐向地貌高地迁移,形成多期环带状分布的颗粒滩带(图 7-a)。内缓坡是总体位于浪基面之上的水体环境,由于其相对宽缓,加之局部地貌高地的障壁作用,导致内缓坡内带波浪能量逐渐消减,水体相对局限,以半局限海环境为主。总体上,内缓坡外带和中缓坡内带水动力条件相对较强,是颗粒滩带发育的主要相区(图 7-a)。

继承性古隆起晚期(SQ2),构造活动相对稳定,但仍继承北倾缓坡地貌格局。同样发育多条环古隆起分布的颗粒滩带,并且由于该时期处于三级层序高位体系域,相对海平面下降导致内缓坡容易形成局限、蒸发环境,因而在SQ2层序顶部多见颗粒白云岩或细-粉晶白云岩发育(图 4-a, 4-c)。同时,继承性古隆起晚期(SQ2)也是川北初始伸展期,勉略洋向北俯冲加速,对四川盆地北缘产生的强烈拖曳拉张作用首次传递至盆地东北部,并形成第 I 期构造坡折带,导致盆地东北局部发生沉降,形成水体较深的外缓坡环境。因此,该时期四川盆地主要为远端变陡的缓坡沉积环境(图 7-b),这与继承性古隆起早期(SQ1)的均斜缓坡环境有所区别。总体而言,海西早期继承性古隆起是控制茅口早期构造沉积演化的主要因素,但由于其北倾缓坡地貌尚未完全填平,因而川西南古隆起形态对茅口中期相带展布仍具有深远影响。

3.2.2 川北持续伸展主导的镶边台地发育阶段 (SQ3-SQ5)

在继承性古隆起控制的茅口早期缓坡沉积之后,川北持续伸展作用及其形成的后撤式多级坡折带开始成为控制茅口组构造古地貌快速分异和沉积体系演变的关键构造因素。川北持续伸展早期(SQ3),受勉略洋持续向北俯冲影响,四川盆地北部伸展作用加强,形成向南迁移的第 II 期构造坡折带。第 II 期坡折带主要发育在通江-宣汉-万州一线,导致川东北地区出现更大范围的显著沉降,并快速相变为深水盆地,而坡折带南侧水体能量高,颗粒滩较发育,形成弱镶边碳酸盐岩台地沉积环境,因此该时期是四川盆地从缓坡沉积体系向镶边台地沉积体系过渡的关键时期。另外,该时期具有继承性古隆起和多级坡折带共同控制盆内沉积格局的特征,即川西南地区总体以古隆起控制为主,围绕川西南古隆起发育多套环带状颗粒滩;勉略洋俯冲产生的伸展作用主要影响川北地区的沉积演化,不仅形成第 II 期坡折带,还在广元-达州一线形成台内拉张洼陷区,因此川北地区颗粒滩具有北西-南东向线性展布特征(图 7-c)。

川北持续伸展中期(SQ4),勉略洋再次向北俯冲加速,导致四川盆地产生强烈的拉张作用,形成第 III 期构造坡折带,并造成剑阁-营山-忠县一线以北的区域大面积沉降,形成广阔的深水盆地。

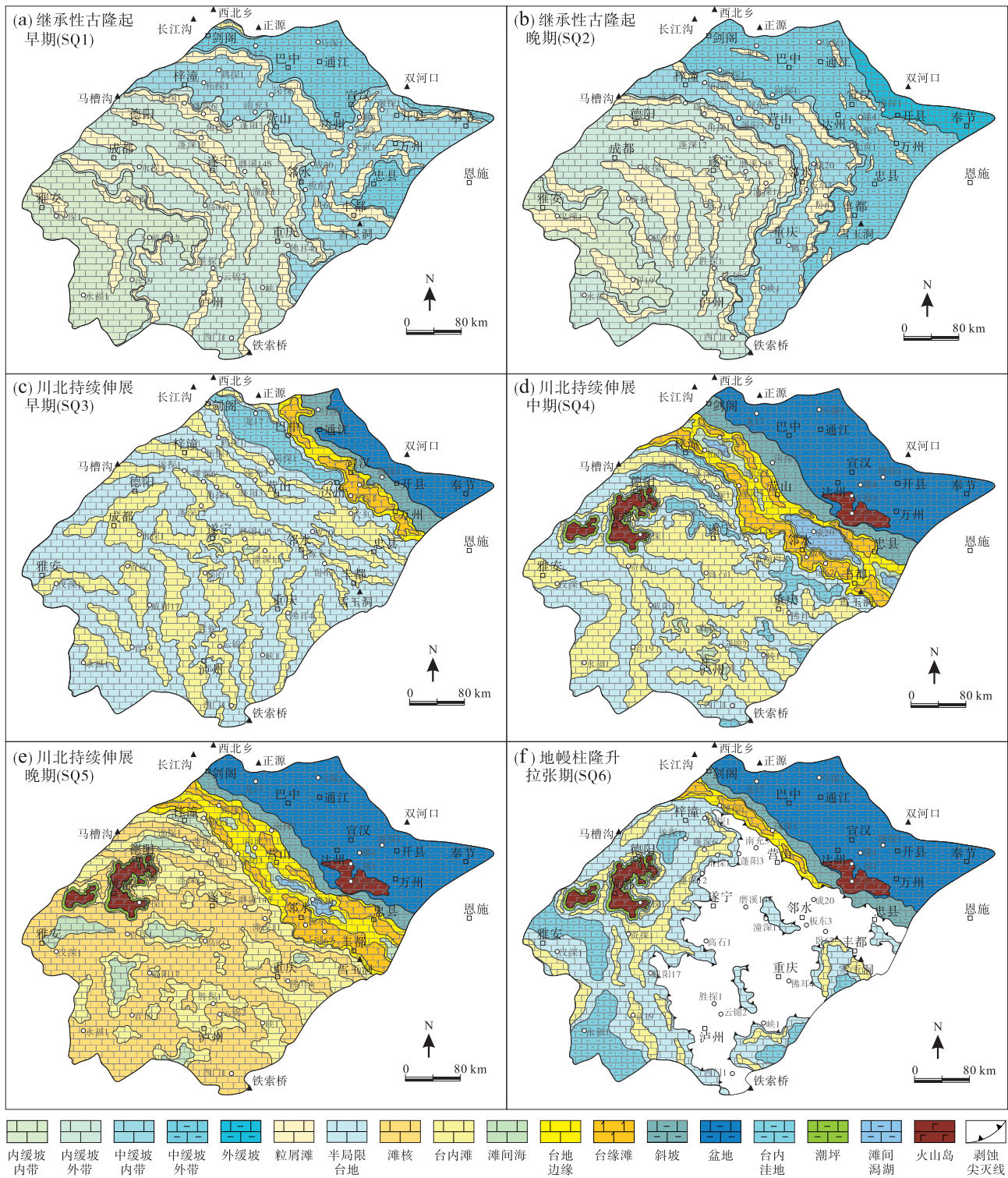


图 7 四川盆地中二叠统茅口组构造-层序-岩相古地理图

Fig. 7 Tectonic-sequence-lithofacies palaeogeographic map of the Middle Permian Maokou Formation in Sichuan Basin

这一强烈的拉张作用使得四川盆地出现茅口期最显著的台盆分异格局，奠定了“南高北低”的地貌格局，第Ⅲ期坡折带以南形成稳定的台地边缘，茅口组镶边碳酸盐岩台地沉积格局基本形成。强烈的

拉张作用也加剧了盆地南部台地内隆拗地貌分异，发育多排平行于台地边缘的台内滩带。此时，仅川西南地区相带展布仍以古隆起控制为主(图 7-d)。另一方面，近期研究揭示在茅口组沉积期四川盆地

受下部热点活动影响,在川东北—川西—川西南形成断续、线性分布的火山岩,茅口组沉积期火山岩侵位在盆地内形成局部火山岛高地貌(许强等,2025)。因此,在火山岛高地边缘主要发育潮坪沉积,而在环火山岛的水下高地则形成环带状障壁滩(图 7-d)。

川北持续伸展晚期(SQ5),随着勉略洋进入相对稳定的俯冲阶段,盆地北部构造体系相对平静,第Ⅲ期坡折带控制的台地边缘得以长期稳定的发育,形成大规模的台地边缘滩沉积,因此该沉积期整体继承前期镶边碳酸盐岩台地沉积格局。此外,川北持续伸展晚期处于中二叠世全球海平面持续下降的阶段,碳酸盐岩台地水体总体较浅,发育一套几乎遍及整个碳酸盐岩台地的滩相颗粒岩,而这种巨型浅滩化特征可能与平静的古构造环境、相对平坦的古地貌和海平面高频变化引起的滩体叠置迁移相关(谭秀成等,2014)。在持续海退和较高的滩体沉积速率的共同控制下,位于地貌高地的颗粒滩向上建造到海平面附近时因出露海面而中止生长,地貌高地周围低地受海平面下降影响也处于浪基面之上较强的水动力环境,造成颗粒滩由高地向低地叠置迁移和生长,使得颗粒滩横向连片分布,促使盆地级巨型浅滩的形成(图 7-e)。

总体上,川北持续伸展作用对四川盆地茅口组构造沉积演化过程的控制时间较长,持续影响了茅口组 SQ2 末期—SQ5 时期的古地理格局。其中 SQ3—SQ4 时期为勉略洋向北俯冲加速形成多级坡折带的构造活跃期,这一阶段北东向伸展构造作用强烈,四川盆地由北倾缓坡地貌格局向“南高北低、南台北盆”的构造古地貌快速转换,从而推动四川盆地从缓坡台地向镶边碳酸盐岩台地沉积环境演变。尽管 SQ5 时期北东向拉张作用开始减弱,但 SQ5 时期古地理格局仍严格受到第Ⅲ级坡折带形成的台盆分异格局控制,并且这一台盆分异格局一直持续至茅口末期,甚至影响了晚二叠世古地理格局(文龙等,2023)。

3.2.3 地幔柱隆升拉张控制的岩相古地理分异阶段(SQ6)

中二叠世末期热点“迁移”至上扬子西南缘,大量地幔物质快速上涌对地壳产生顶托作用,使得 ELIP 内带至中带地壳大幅隆升,内带隆升幅度可超过 1300 m(何斌等,2005),而处于 ELIP 外带

的川西南地区由于受到地幔柱隆升产生的远端拉张作用影响,形成规模较大的弧形拗陷区(许强等,2025)。峨眉山地幔柱隆升导致川西南拗陷的发育是茅口晚期最显著的构造分异现象,这一构造分异过程造成川西南拗陷持续沉降和扩张。因此,地幔柱隆升—拉张期(SQ6),川西南拗陷具有持续上超沉积充填特征,沉积厚度最大,普遍超过 100 m,主要发育相对低能的台内洼地沉积(图 7-f)。与此同时,地幔柱隆升—拉张期全球海平面较低,台地上的地貌高地因可容空间不足而沉积厚度较小,而川北地区台地边缘—斜坡相带为沉积物提供充足的可容空间,造成台缘滩向斜坡方向快速前积,形成厚度增加带(图 2-e)。

中二叠世末期,东吴运动致使四川盆地整体抬升,结束了茅口组海相沉积,并导致 SQ6 层序顶部出露地表,整体遭受一定程度的剥蚀,层序保存不全,尤其是川中和川南等 SQ6 沉积厚度小的地区被剥蚀殆尽而出现缺失(图 7-f)。

4 控储意义

4.1 隆拗分异格局控制的滩相储集层发育规律

大量研究表明,碳酸盐颗粒滩分布受沉积期隆拗地貌控制,而颗粒滩又是碳酸盐岩储集层发育的有利场所(马涛等,2024)。同时,研究区储集岩岩石学特征统计发现,茅口组白云岩和石灰岩储集层与颗粒滩相具有良好的耦合性,储集层原始岩性多以颗粒岩为主,表明颗粒滩相在茅口组成储机制中具有关键作用(表 2)。

白云岩储集层是茅口组重要的储集岩类型,近期研究发现茅口组白云岩储集层具有受“古地貌—颗粒滩—白云石化—岩溶”四要素联合控制的特征(谭秀成等,2025)。具体而言,沉积期古地貌高地及其坡折带是颗粒滩相发育的有利部位,海平面高频振荡条件下发育于微地貌高地上的颗粒滩容易发生叠置迁移,导致局部环境受限,从而促进准同生期白云石化作用在高孔渗颗粒滩体内广泛进行(杨文杰等,2022)。早成岩期岩溶作用也受沉积期古地貌严格控制,微地貌高地及其坡折带同样是岩溶作用的有利场所。茅口早期缓坡沉积格局下云化浅滩的发育明显受古地貌高地的控制,主要分

表 2 四川盆地茅口组有利储集区带的储集层岩性特征及天然气测试效果

Table 2 Lithological characteristics of reservoirs and gas test results in favorable reservoir zones of the Maokou Formation, Sichuan Basin

沉积相类型	有利区	钻井	储集层厚度/m	储集岩类型	测试日产气/10 ⁴ m ³	层位	
台缘滩	梓潼—邻水—丰都	卧 67	12.0	孔洞型滩相白云岩	64.28	SQ4-SQ5	
		板东 3	13.0		83.20		
		蓬阳 3	11.0		213.15		
	巴中—宣汉—万州	五探 1	14.0	白云质颗粒灰岩	83.20	SQ3	
		罐 4	8.0		117.80		
台内滩	川中地区	潼深 11	13.4	孔洞型滩相白云岩	233.80	SQ3	
		磨溪 145	14.0		212.30		
	川西地区	角探 1	16.0		112.80	SQ4	
		蓬深 6	11.0		146.00		
	川南地区	云锦 2	45.0		白云质颗粒灰岩	70.76	SQ3-SQ4
		胜探 1	8.4			54.68	

布在内缓坡内带和外带，内缓坡浅滩容易高频暴露，发生早成岩期岩溶作用和白云石化作用（图 8-a）。茅口中晚期浅水台地沉积格局下，隆坳分异地貌控制的带状台缘滩和台内滩沉积能量高、水体浅（图 8-b），更易受高频层序控制而发生白云石化和早成岩期岩溶作用，可形成规模分布的滩相白云岩储集层。综上所述，基于茅口组滩控岩溶型白云岩储集层成因模式的认识，沉积期古地貌及其控制的颗粒滩相是储集层预测关键（谭秀成等，2025）。

按照“走出构造找岩溶”的勘探思路，川南地区在岩溶孔隙型颗粒灰岩储集层勘探上也取得较大突破（沈华等，2023；肖笛等，2024）。茅口组内幕颗粒灰岩储集层远离风化壳暴露不整合面，主要受沉积期微古地貌、颗粒滩相以及准同生期溶蚀作用控制（肖笛等，2024），与传统的风化壳岩溶灰岩储集层成储机制具有显著差别。该类储集层纵向上受层序界面控制可能存在多期次发育特征，平面上具有颗粒滩相规模控储的规律，在盆地中分布范围较广，具有良好的勘探前景。此外，岩溶孔隙型灰岩储集层中多见颗粒白云岩，这主要是由于岩溶孔隙型灰岩储集层往往是滩相白云岩的原始岩相，在白云石化条件较强的条件下多呈滩相白云岩储集层产出，而在白云石化条件较弱的条件下则保持了原始灰岩岩性（图 8-c）。由此可见，颗粒灰岩储集层与颗粒白云岩储集层具有类似的成储机制，只是缺乏规模白云石化作用，二者发育的有利场所均为微地貌高地控制的颗粒滩相（表 2）。

4.2 有利储集区带分布

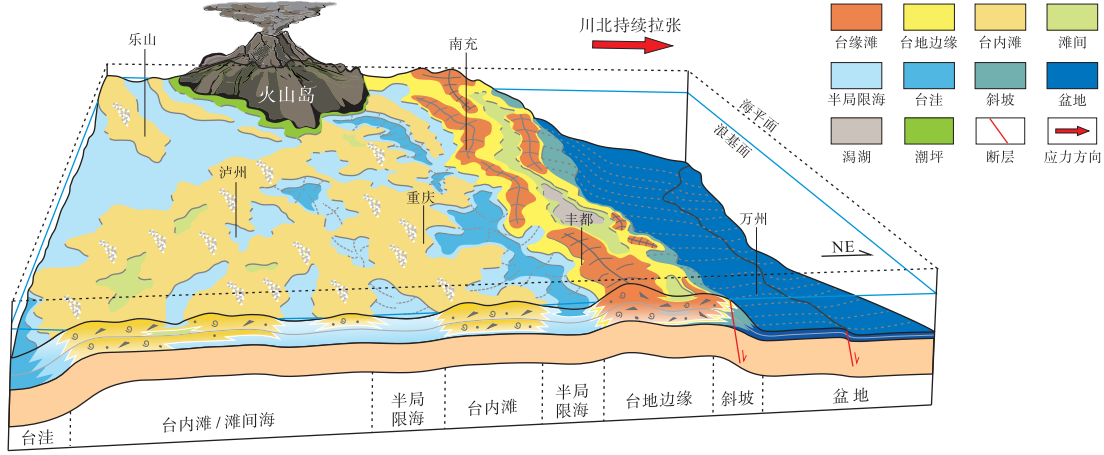
依据盆地内钻井储集层的识别和统计，基于上述有关滩相储集层发育规律的认识，在沉积相带的约束下编制了四川盆地茅口组储集层厚度平面分布图（图 9）。

茅口组构造-岩相古地理演化表明，继承性古隆起发育期—川北持续伸展早期（SQ1-SQ3）主要具有海西早期古隆起控滩规律，因此这一阶段滩控储集层均具有环川西南高地带状分布的特征，平面上呈多排多带分布规律，纵向上多层储集层累计厚度一般介于 4~12 m 之间，最厚可达 24 m。受第 I、II 期坡折带控制的隆坳格局影响，盆地北部同样发育北西—南东向带状展布的滩相储集层，尤其是川北持续伸展早期（SQ3）弱镶边台地边缘带储集层规模最大，储集层厚度主要为 4~16 m（图 9-a）。

茅口中晚期多级坡折带控制的台-盆分异格局是控制颗粒滩相及其储集层分布的关键因素。北东向伸展构造导致盆地内出现显著的带状隆坳分异格局，因此滩相储集层主要沿台缘滩、台内滩等高地貌区分布，总体具有呈北西—南东向平行带状展布的规律。与此同时，由于茅口末期川西南坳陷的发育，在川西南地区 SQ6 层序滩相储集层具有环坳陷区的弧形分布规律。总体上，茅口组上部层序储集层累计厚度为 4~20 m（图 9-b），储集层厚度和规模总体好于茅口组下部。

综合茅口组岩相古地理格局、储集层厚度平面分布及其钻井油气显示、测试结果，认为四川盆地

(b) 持续拉张的隆坳分异地貌控滩模式



(a) 缓坡地貌控滩模式

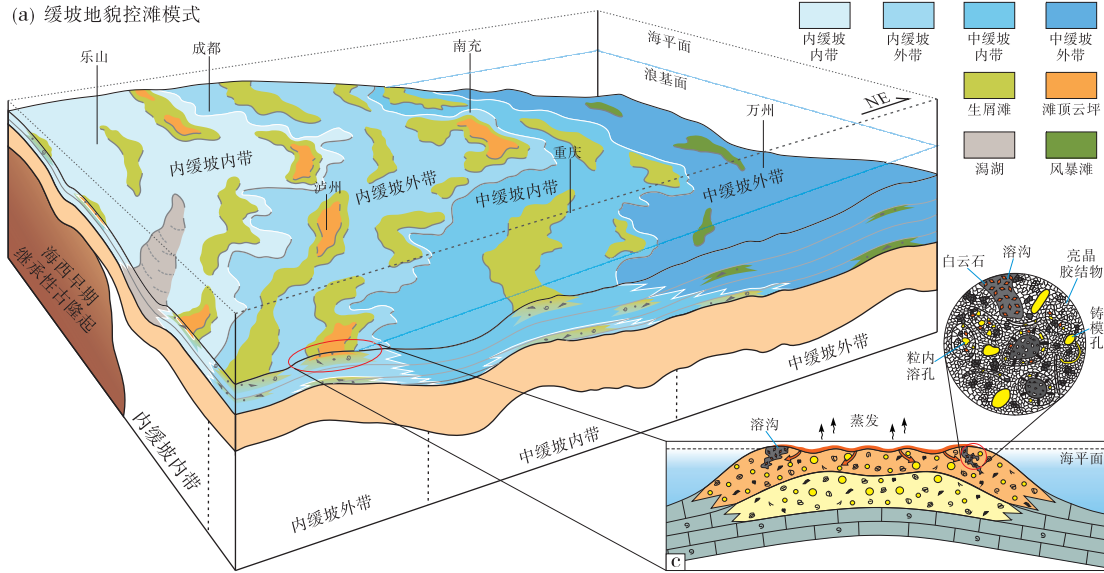
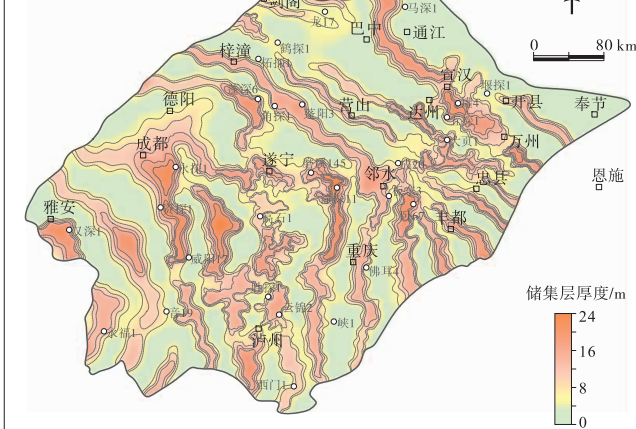


图 8 四川盆地中二叠统茅口组构造古地貌控滩控储模式

Fig. 8 Model of constructing ancient landforms for controlling beaches and reservoirs in the Maokou Formation, Sichuan Basin

(a) 继承性古隆起-川北伸展早期(SQ1-SQ3) 储集层厚度图



(b) 川北伸展中期-地幔柱隆升拉张期(SQ4-SQ6) 储集层厚度图

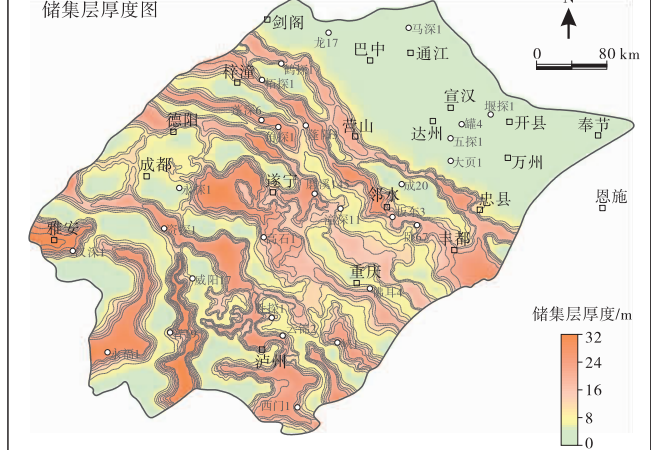


图 9 四川盆地中二叠统茅口组储集层厚度平面分布

Fig. 9 Planar distribution map of reservoir thickness in the Maokou Formation, Sichuan Basin

茅口组主要发育 3 类有利储集区带。(1) 多级坡折带控制的台缘滩相有利储集区, 主要受后撤式多级坡折带控制, 在川北地区发育有 2 个带, 其中第Ⅲ期坡折带控制的梓潼—邻水—丰都有利储集区是茅口组目前最现实的勘探区带, 第 I、II 期坡折带控制的巴中—宣汉—万州有利储集区目前勘探程度较浅, 可作为重要接替领域。(2) 台内高地颗粒滩相有利区, 主要发育在川北持续伸展期 (SQ4-SQ5), 强烈的伸展作用导致台内滩同样具有平行带状展布规律, 滩体相对连续且规模较大, 目前局部勘探已取得成效, 总体勘探前景良好。(3) 海西早期古隆起控制的滩相有利储集区, 主要发育在 SQ1-SQ3 时期, 尽管缓坡地貌控制的迁移性滩相储集层厚度较小, 但其平面规模较大, 目前仅在磨溪—潼南地区取得较大突破, 其余薄储层滩带可作为下步勘探接替领域。

5 结论

1) 四川盆地中二叠统茅口组主要发育 2 个三级层序 SSQ1-SSQ2 和 6 个四级层序 SQ1-SQ6。受海西早期继承性古隆起和全球海平面持续上升影响, SQ1-SQ2 层序具有上超沉积充填特征; 川北持续伸展作用导致 SQ3-SQ5 层序在盆地北部为欠补偿沉积, 盆地南部以加积充填为主; SQ6 层序在川西南地区受地幔柱隆升拉张拗陷持续发育影响形成上超沉积充填, 而在台地边缘为前积充填。

2) 茅口组主要经历 3 个构造-沉积演化阶段: (1) 海西早期继承性古隆起发育期 (SQ1-SQ2), 四川盆地形成“西南高、北东低”的北倾缓坡古地貌, 并在缓坡地貌基础上发育稳定的碳酸盐岩缓坡沉积; (2) 川北持续伸展期 (SQ3-SQ5), 北东向强烈拉张作用形成 3 期后撤式坡折带, 导致川北地区逐级沉降为斜坡—盆地相区, 沉积体系向镶边碳酸盐岩台地转变, 且沉积相带呈现明显的北东向分带特征; (3) 地幔柱隆升-拉张期 (SQ6), 川西南地区受峨眉山地幔柱隆升产生的远端拉张应力影响形成弧形拗陷带, 发育宽缓的台内洼地并成为茅口末期的沉积中心。

3) 茅口组储集层具有多期多带发育特征, 且空间分布主要受颗粒滩相控制。茅口中晚期多级坡折带控制的台缘滩相有利储集区规模较大, 是目前扩大勘探的重点领域; 茅口早期缓坡地貌控制的迁

移性颗粒滩带和茅口中晚期强烈伸展作用控制的带状平行展布的台内滩带也具有较大规模, 可作为潜在的有利勘探区带。

参考文献 (References)

- 曹华, 山述娇, 田辰, 张玺华, 彭翰林, 刘沛云, 陈聪, 高兆龙, 胡罗嘉, 谢静平, 李天军, 胡广. 2024. 川东—川北地区二叠系茅口组沉积演化及其油气地质意义. 石油实验地质, 46(3): 460-471. [Cao H, Shan S J, Tian C, Zhang X H, Peng H L, Liu P Y, Chen C, Gao Z L, Hu L J, Xie J P, Li T J, Hu G. 2024. Sedimentary evolution and petroleum geological significance of Permian Maokou Formation in eastern and northern Sichuan Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 46(3): 460-471]
- 陈宗清. 2007. 四川盆地中二叠统茅口组天然气勘探. 中国石油勘探, 12(5): 1-11, 78. [Chen Z Q. 2007. Exploration for natural gas in Middle Permian Maokou formation of Sichuan basin. *China Petroleum Exploration*, 12(5): 1-11, 78]
- 邓莉, 闫全人, 宋博, 高山林. 2021. 中—晚二叠世上扬子地块 (四川盆地) 裂解的沉积响应. 岩石学报, 37(8): 2465-2482. [Deng L, Yan Q R, Song B, Gao S L. 2021. Sedimentary responses to rifting of the Upper Yangtze Block (Sichuan Basin area) in the Middle-Late Permian. *Acta Petrologica Sinica*, 37(8): 2465-2482]
- 冯增昭, 杨玉卿, 金振奎, 何幼斌, 吴胜和, 辛文杰, 鲍志东, 谭健. 1996. 中国南方二叠纪岩相古地理. 沉积学报, 14(2): 3-12. [Feng Z Z, Yang Y Q, Jin Z K, He Y B, Wu S H, Xin W J, Bao Z D, Tan J. 1996. Permian lithofacies Palaeogeography in Southern China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 14(2): 3-12]
- 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]
- 蒋航, 张玺华, 陈聪, 高兆龙, 山述娇, 罗平, 陈延贵, 李天军, 胡罗嘉. 2023. 川北地区茅口中晚期斜坡相沉积特征及其油气地质意义. 海相油气地质, 28(4): 381-390. [Jiang H, Zhang X H, Chen C, Gao Z L, Shan S J, Luo P, Chen Y G, Li T J, Hu L J. 2023. Sedimentary characteristics of slope facies in mid-late stage of Moukou Formation in northern Sichuan Basin and its petroleum geological significances. *Marine Origin Petroleum Geology*, 28(4): 381-390]
- 李双应, 孟庆任, 万秋, 孔为伦, 何刚. 2008. 长江中下游地区二叠纪碳酸盐斜坡沉积及其成矿意义. 岩石学报, 24(8): 1733-1744. [Li S Y, Meng Q R, Wan Q, Kong W L, He G. 2008. Deposition of carbonate slope and ore-forming in Permian strata in the Middle-Lower Reaches of the Yangtze River, East China. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8): 1733-1744]
- 刘宝珺, 张继庆, 许效松. 1986. 四川兴文四龙下二叠统碳酸盐风暴岩. 地质学报, 60(1): 55-67, 121-122. [Liu B J, Zhang J Q, Xu X S. 1986. On the calcareous tempestites in the Lower Permian of silong, Xingwen, Sichuan. *Acta Geological Sinica*, 60(1): 55-67, 121-122]
- 陆鹿, 李壮福, 康鹏, 张新. 2014. 安徽巢北地区栖霞组臭灰岩段富有

- 机质成因探讨. 地质论评, 60(1): 71-79. [Lu L, Li Z F, Kang P, Zhang X. 2014. Interpretation of rich organic matter in swine limestone member of the Permian Chihhsia Formation, Chaobei, Anhui. *Geological Review*, 60(1): 71-79]
- 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]
- 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]
- 马涛, 谭秀成, 罗冰, 和源, 许强, 黄茂轩, 李启锐, 龙虹宇, 胡安平. 2024. 多级坡折带对颗粒滩储层的控制及有利勘探区带: 以四川盆地乐山—龙女寺古隆起南斜坡寒武系洗象池组为例. 石油勘探与开发, 51(6): 1317-1330. [Ma T, Tan X C, Luo B, He Y, Xu Q, Huang M X, Li Q R, Long H Y, Hu A P. 2024. Control of hierarchical slope-break zone on grain shoal reservoirs and favorable exploration zones: a case study of Cambrian Xixiangchi Formation in the south slope of Leshan-Longnüsi paleouplift, Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 51(6): 1317-1330]
- 梅庆华, 何登发, 文竹, 李英强, 李皎. 2014. 四川盆地乐山—龙女寺古隆起地质结构及构造演化. 石油学报, 35(1): 11-25. [Mei Q H, He D F, Wen Z, Li Y Q, Li J. 2014. Geologic structure and tectonic evolution of Leshan-Longnüsi paleo-uplift in Sichuan Basin, China. *Acta Petrolei Sinica*, 35(1): 11-25]
- 彭金宁, 杜崇娇, 李龙龙, 蒋小琼, 潘文蕾, 陆永德, 罗开平. 2023. 四川盆地中二叠世岩相古地理及其油气地质意义. 石油实验地质, 45(1): 49-59. [Peng J N, Du C J, Li L L, Jiang X Q, Pan W L, Lu Y D, Luo K P. 2023. Lithofacies Palaeogeography of Middle Permian in the Sichuan Basin and its petroleum geological significance. *Petroleum Geology & Experiment*, 45(1): 49-59]
- 山克强, 孟晓荣. 2022. 云南镇雄二叠系栖霞组—茅口组沉积微相及沉积环境演变. 地层学杂志, 46(1): 68-85. [Shan K Q, Meng X R. 2022. Carbonate microfacies analysis and evolution of depositional environment of the Chihhsia Formation and the Maokou Formation (Middle Permian) in Zhenxiong, Yunnan. *Journal of Stratigraphy*, 46(1): 68-85]
- 沈华, 杨光, 屈卫华, 孙国翔, 皮雄, 张昌盛. 2023. 四川盆地自贡地区中二叠统茅口组多类型储层特征及分布预测. 中国石油勘探, 28(3): 49-63. [Shen H, Yang G, Qu W H, Sun G X, Pi X, Zhang C S. 2023. Characteristics and prediction of multi-type reservoirs in the Middle Permian Maokou Formation in Zigong area, Sichuan Basin. *China Petroleum Exploration*, 28(3): 49-63]
- 四川油气区石油地质志编写组. 1989. 中国石油地质志·卷10: 四川油气区. 北京: 石油工业出版社. [Sichuan Oil and Gas Region Petroleum Geology Compilation Group. 1989. *Petroleum Geology of China, Volume 10: Sichuan Oil and Gas Region*. Beijing: Petroleum Industry Press]
- 谭秀成, 李凌, 刘宏, 曹剑, 吴小庆, 周素彦, 石学文. 2014. 四川盆地中三叠统雷口组碳酸盐台地巨型浅滩化研究. 中国科学: 地球科学, 44(3): 457-471. [Tan X C, Li L, Liu H, Cao J, Wu X Q, Zhou S Y, Shi X W. 2014. Study on giant shoaling of carbonate platform in Leikoupo Formation of Middle Triassic in Sichuan Basin. *Scientia Sinica(Terrae)*, 44(3): 457-471]
- 谭秀成, 何如意, 杨文杰, 罗冰, 师江波, 张连进, 李明隆, 唐宇欣, 肖笛, 乔占峰. 2025. 四川盆地武胜—潼南地区中二叠统茅口组二段下亚段白云岩薄储层成因及分布模式. 石油勘探与开发, 52(1): 112-127. [Tan X C, He R Y, Yang W J, Luo B, Shi J B, Zhang L J, Li M L, Tang Y X, Xiao D, Qiao Z F. 2025. Origin and distribution model of thin dolomite reservoirs in the lower sub-member of Mao 2 Member of Middle Permian Maokou Formation in Wusheng-Tongnan area, Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 52(1): 112-127]
- 田小彬, 师江波, 董景海, 谭万仓, 印长海, 李强, 宋振宇, 张凯, 肖传桃. 2021. 川中地区茅口组一段沉积相新认识: 基于最新钻井资料. 天然气地球科学, 32(11): 1646-1655. [Tian X B, Shi J B, Dong J H, Tan W C, Yin C H, Li Q, Song Z Y, Zhang K, Xiao C T. 2021. New understanding of sedimentary facies of the first Member of Maokou Formation based on the latest drilling in central Sichuan Basin. *Natural Gas Geoscience*, 32(11): 1646-1655]
- 万秋, 李双应. 2011. 中扬子地区中二叠统沉积及古地理特征. 地质学报, 85(6): 993-1007. [Wan Q, Li S Y. 2011. Sedimentation of the Middle Permian series in the middle Yangtze area and paleogeographical characteristics. *Acta Geologica Sinica*, 85(6): 993-1007]
- 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]
- 文龙, 张本健, 陈骁, 徐亮, 马华灵, 彭瀚霖. 2023. 四川盆地二叠、三叠系构造: 沉积特征及有利勘探区带. 天然气勘探与开发, 46(4): 1-12. [Wen L, Zhang B J, Chen X, Xu L, Ma H L, Peng H L. 2023. Permian and Triassic in Sichuan basin: tectono-sedimentary characteristics and favorable exploration belts. *Natural Gas Exploration and Development*, 46(4): 1-12]
- 吴福元, 万博, 赵亮, 肖文交, 朱日祥. 2020. 特提斯地球动力学. 岩石学报, 36(6): 1627-1674. [Wu F Y, Wan B, Zhao L, Xiao W J, Zhu R X. 2020. Tethyan geodynamics. *Acta Petrologica Sinica*, 36(6): 1627-1674]
- 肖笛, 黄天海, 张本健, 刘冉, 高兆龙, 李明隆, 杨文杰, 谭秀成. 2024. 四川盆地南部向斜区二叠系岩溶孔隙型石灰岩储层成因与天然气勘探新领域. 天然气工业, 44(2): 52-67. [Xiao D, Huang T H, Zhang B J, Liu R, Gao Z L, Li M L, Yang W J, Tan X C. 2024. Permian Karst porous limestone reservoir in the syncline area of southern Sichuan Basin: origin and new field of natural gas exploration. *Natural Gas Industry*, 44(2): 52-67]
- 许强, 杨文杰, 文龙, 李双建, 罗冰, 肖笛, 乔占峰, 刘士君, 李明隆, 郭杰, 谭先锋, 石书缘, 谭秀成. 2025. 四川盆地中二叠世多期坡折带对古地貌和滩体规模的控制作用. 石油勘探与开发, 52(4): 1-15. [Xu Q, Yang W J, Wen L, Li S J, Luo B, Xiao D, Qiao Z

- F, Liu S J, Li M L, Guo J, Tan X F, Shi S Y, Tan X C. 2025. Formation of Mid-Permian multistage slope-break zones and their controls on development of paleogeomorphology and Large-scale shoal bldy in Sichuan Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 52(4): 1-15]
- 薛武强,刘喜停,颜佳新,马志鑫. 2015. 重庆南川地区中二叠统茅口组眼球状灰岩成因. *地质科学*, 50(3): 1001-1013. [Xue W Q, Liu X T, Yan J X, Ma Z X. 2015. The origin of eyeball-shaped limestone from Maokou Formation (Mid-Permian) in Nanchuan region, Chongqing, Southwest China. *Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica)*, 50(3): 1001-1013]
- 杨巍,张廷山,刘治成,黄浩,闵华军,杨扬. 2014. 地幔柱构造的沉积及环境响应: 以峨眉地幔柱为例. *岩石学报*, 30(3): 835-850. [Yang W, Zhang T S, Liu Z C, Huang H, Min H J, Yang Y. 2014. Sedimentary and environmental responses to mantle plume: a case study of Emeishan mantle plume. *Acta Petrologica Sinica*, 30(3): 835-850]
- 杨文杰,谭秀成,李明隆,夏吉文,隆辉,倪佳,李军,肖笛,张照坤. 2022. 四川盆地威远—高石梯地区中二叠统栖霞组台内薄层白云岩发育特征与成因. *中国石油勘探*, 27(4): 75-90. [Yang W J, Tan X C, Li M L, Xia J W, Long H, Ni J, Li J, Xiao D, Zhang Z K. 2022. Development characteristics and genesis of thin layered dolomite of the Middle Permian Qixia Formation in the platform in Weiyuan-Gaoshiti area, Sichuan Basin. *China Petroleum Exploration*, 27(4): 75-90]
- 杨雨,文龙,陈聪,汪华. 2023. 四川盆地西部二叠系多期台缘带油气勘探潜力. *地学前缘*, 30(1): 1-10. [Yang Y, Wen L, Chen C, Wang H. 2023. Oil and gas exploration potential of the Permian multi-stage platform-margin zone, western Sichuan Basin. *Earth Science Frontiers*, 30(1): 1-10]
- 张玺华,陈聪,黄婕,文龙,谢忱,徐诗薇,高兆龙. 2019. 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. *中国石油勘探*, 24(4): 466-475. [Zhang X H, Chen C, Huang J, Wen L, Xie C, Xu S W, Gao Z L. 2019. The discovery of Middle Permian Guangyuan-Bazhong extensional trough in the Sichuan Basin and its petroleum geological significance. *China Petroleum Exploration*, 24(4): 466-475]
- 张庄,宋晓波,苏成鹏,李蓉,王东,石国山. 2023. 四川盆地中二叠统茅口组一段岩石微相特征及储层成因: 以华蓥山二崖剖面为例. *断块油气田*, 30(3): 405-414. [Zhang Z, Song X B, Su C P, Li R, Wang D, Shi G S. 2023. Characteristics of rock microfacies and reservoir genesis of the first Member of Middle Permian Maokou Formation in Sichuan Basin: A case study of Erya section of Huaying Mountain. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 30(3): 405-414]
- 赵宗举,周慧,陈轩,刘银河,张运波,刘玉娥,杨雨. 2012. 四川盆地及邻区二叠纪层序岩相古地理及有利勘探区带. *石油学报*, 33(S2): 35-51. [Zhao Z J, Zhou H, Chen X, Liu Y H, Zhang Y B, Liu Y E, Yang Y. 2012. Sequence lithofacies paleogeography and favorable exploration zones of the Permian in Sichuan Basin and adjacent areas, China. *Acta Petrologica Sinica*, 33(S2): 35-51]
- 钟怡江,侯梅生,夏杰,林良彪,龙宇. 2014. 重庆石柱中二叠统栖霞组和茅口组沉积微相. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 41(4): 458-467. [Zhong Y J, Hou M S, Xia J, Lin L B, Long Y. 2014. Microfacies of Qixia formation and Maokou formation in Shizhu, Chongqing, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 41(4): 458-467]
- 钟原,杨跃明,文龙,罗冰,肖笛,李明隆,陈聪,赵立可,芦飞凡,谭秀成. 2021. 四川盆地西北部中二叠统茅口组岩相古地理、古岩溶地貌恢复及其油气地质意义. *石油勘探与开发*, 48(1): 81-93. [Zhong Y, Yang Y M, Wen L, Luo B, Xiao D, Li M L, Chen C, Zhao L K, Lu F F, Tan X C. 2021. Reconstruction and petroleum geological significance of lithofacies paleogeography and paleokarst geomorphology of the Middle Permian Maokou Formation in northwestern Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 48(1): 81-93]
- 周进高,姚根顺,杨光,谷明峰,姚倩颖,江青春,杨柳,杨雨然. 2016. 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. *天然气工业*, 36(4): 8-15. [Zhou J G, Yao G S, Yang G, Gu M F, Yao Q Y, Jiang Q C, Yang L, Yang Y R. 2016. Lithofacies Paleogeography of Qixia Formation—Maokou Formation in Sichuan Basin and favorable exploration zones for natural gas. *Natural Gas Industry*, 36(4): 8-15]
- Dong Y P, Sun S S, Santosh M, Hui B, Sun J P, Zhang F F, Cheng B, Yang Z, Shi X H, He D F, Yang L, Cheng C, Liu X M, Zhou X H, Wang W, Qi N. 2022. Cross orogenic belts in Central China: implications for the tectonic and paleogeographic evolution of the east Asian continental collage. *Gondwana Research*, 109: 18-88.
- Elder W P, Gustason E R, Sageman B B. 1994. Correlation of basinal carbonate cycles to nearshore parasequences in the Late Cretaceous Greenhorn seaway, Western Interior U.S.A. *Geological Society of America Bulletin*, 106(7): 892-902.
- Eldrett J S, Ma C, Bergman S C, Ozkan A, Minisini D, Lutz B, Jackett S J, MacAulay C, Kelly A E. 2015. Origin of limestone-marlstone cycles: astronomic forcing of organic-rich sedimentary rocks from the cenomanian to early coniacian of the Cretaceous western interior seaway, USA. *Earth and Planetary Science Letters*, 423: 98-113.
- Flügel E. 2010. *Microfacies of Carbonate Rocks Analysis, Interpretation and Application*. Springer.
- Huang B C, Yan Y G, Piper J D A, Zhang D H, Yi Z Y, Yu S, Zhou T H. 2018. Paleomagnetic constraints on the paleogeography of the east Asian blocks during Late Paleozoic and early Mesozoic times. *Earth-Science Reviews*, 186(1): 8-36.
- Xiao D, Huang T H, Xu Q, Tan X C, Wen L, Zheng J F, Cao J. 2024. Two pulsed activities of the Emeishan large igneous province in southwestern China inferred from dolomite U-Pb geochronology and significance. *Geological Society of America Bulletin*, 136(9-10): 3977-3992.
- Xu J, Xia X P, Lai C, Long X P, Huang C. 2019. When did the paleotethys Ailaoshan Ocean close: New insights from detrital zircon U-Pb age and Hf isotopes. *Tectonics*, 38(5): 1798-1823.
- Yang W J, Tan X C, Tang D H, Zhang Z K, Hu X, Li M L, Zeng Z X, Xiao D. 2024. Sequence lithofacies paleogeography evolution of the Middle Permian Maokou Formation in the northwest margin of the Sichuan Basin. *Frontiers in Earth Science*, 11: 1301302.